

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**ІНЖЕНЕРНО-ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
**Кафедра хімічного полімерного і силікатного машинобудування**  
Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

«На правах рукопису»

УДК 66.041.49:66.042.3-048.35

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Гондляр О.В.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019р.

**Магістерська дисертація**

зі спеціальності 133 – Галузеве машинобудування

спеціалізація Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів

на тему: Піч обертова для прожарювання нафтового коксу з модернізацією вузла підводу повітря

виконав студент 2 курсу, групи ЛПЗ-81мп

Глухов Олександр Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ д.т.н., проф. Карвацький А.Я. \_\_\_\_\_

Консультант (модернізація) \_\_\_\_\_ проф. Щербина В.Ю. \_\_\_\_\_

Консультант (ТМ та Е) \_\_\_\_\_ ст. викл. Борщик С.О. \_\_\_\_\_

Рецензент \_\_\_\_\_ к.т.н., доц.. Коржик М.В. \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань

Студент \_\_\_\_\_

Київ 2019 рік

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет інженерно-хімічний

Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) 133 – Галузеве машинобудування  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ О.В.Гондлях  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту  
Глухову Олександрю Миколайовичу**

1. Тема дисертації: «Піч обертова для прожарювання нафтового коксу з модернізацією вузла підводу повітря»  
науковий керівник дисертації: Карвацький Антон Янович, д.т.н., проф.  
затверджені наказом по університету від « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_
  2. Строк подання студентом дисертації \_\_\_\_\_
  3. Об'єкт дослідження: процес прожарювання сипких вуглецевмісних матеріалів.
  4. Предмет дослідження: тепло-гідродинамічний та механічний стан обертової печі для високотемпературного оброблення нафтового коксу.
  5. Перелік завдань, які потрібно розробити: модернізація вузла підводу повітря в зону прожарювання обертової печі та дослідження фізичних полів пічного обладнання для підтвердження його експлуатаційної придатності.
  6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_

7. Орієнтовний перелік публікацій: тези доповіді у збірниках доповідей

конференцій, заявка на патент України на корисну модель

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Монтаж і експлуатація обладнання	Борщик С.О.		
Модернізація	Щербина В.Ю., д.т.н., проф.		
Перевірка на оригінальність	Щербина В.Ю., д.т.н., проф.		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Опис технологічного процесу прожарювання нафтового коксу		
2	Технічна характеристика обертової печі для прожарювання нафтового коксу		
3	Патентно-літературний огляд модернізації вузла з підводу повітря в зону прожарювання		
4	Інженерні розрахунки обертової печі для прожарювання нафтового коксу		
5	Розрахунки теплової потужності обертової печі за різної продуктивності		
6	Монтаж і експлуатація обертової печі		
7	Розробка стартап проекту		
8	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях		
9	Модернізація вузла обертової печі з підводу повітря		
10	Висновки		

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

О.М. Глухов  
(ініціали, прізвище)

Керівник дисертації

\_\_\_\_\_ (підпис)

А.Я. Карвацький  
(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

УДК 66.041.49:66.042.3-048.35

Магістерська дисертація Піч обертова для прожарювання нафтового коксу з модернізацією вузла підводу повітря» / О. М. Глухов. КПІ ім. Ігоря Сікорського; н.керівник А. Я. Карвацький. Робота містить: \_\_ с., \_\_ рис., \_\_ табл., \_\_ дод., \_\_ посилань.

**Об'єкт дослідження:** процес прожарювання сипких вуглецевмісних матеріалів.

**Предмет дослідження:** тепло-гідродинамічний та механічний стан обертової печі для високотемпературного оброблення нафтового коксу.

**Мета роботи:** модернізація вузла підводу повітря в зону прожарювання обертової печі та дослідження фізичних полів пічного обладнання для підтвердження його експлуатаційної придатності.

**Результати роботи та їх новизна.** У результаті виконаних у дисертації досліджень вперше отримані такі наукові результати:

- 1) Дослідження фізичного стану обладнання з метою визначення працездатності запропонованої модернізації вузла для подачі повітря в зону прожарювання печі з використанням розроблених дискретних та континуальних числових моделей обертової печі в цілому та її вузлів.
- 2) Аналіз достовірності отриманих результатів числового моделювання.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у такому:

- 1) Розроблено 3D числові моделі для дослідження фізичного стану обертових печей базової та модернізованої конструкцій в дискретному та континуальному наближеннях.
- 2) Подано заявку патент України на корисну модель, що включає пристрій для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі .

За темою дисертації опубліковано у співавторстві 2 друковані праці, у тому числі 1 доповідь у збірниках доповідей конференцій, 1 заявка на патент України на корисну модель (подана).

ОБЕРТОВА ПІЧ, НАФТОВИЙ КОКС, ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНЕ  
ОБРОБЛЕННЯ, ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ТЕПЛО-ГІДРОДИНАМІЧНИЙ  
ТА МЕХАНІЧНИЙ СТАН, ЗОНА ПРОЖАРЮВАННЯ, ПОВІТРЯ.

## ABSTRACT

UDK 66.041.49:66.042.3-048.35

Master's thesis "Rotary kiln for calcining petroleum coke with modernization of the air intake unit" / O. M. Hlukhov. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; scientific director A. Ya. Karvatskii. The manuscript contains: \_\_ p., \_\_ fig., \_\_ tabl., \_\_ appendix, \_\_ reference.

**Object of research:** the process of calcining bulk carbonaceous materials.

**Subject of research:** Thermo-hydrodynamic and mechanical condition of a rotary kiln for high-temperature treatment of petroleum coke.

**The objective of the work:** modernization of the air intake unit in the zone of annealing of the rotary kiln and investigation of the physical fields of the furnace equipment to confirm its operational suitability.

**The results of the work and their originality.** As a result of the research carried out in the dissertation, the following scientific results were obtained for the first time:

- 1) Investigation of the physical condition of the equipment in order to determine the efficiency of the proposed modernization of the unit for supplying air into the zone of annealing the furnace using the developed discrete and continuous numerical models of the rotary kiln as a whole and its units.
- 2) Analysis of the reliability of the obtained numerical simulation results.

**The practical significance of the results obtained** is as follows:

- 1) 3D numerical models have been developed to investigate the physical condition of rotary kilns of basic and modernized structures in discrete and continuous approximations.
- 2) The patent of Ukraine for a utility model, including a device for supplying atmospheric air to the rotary kiln drum, has been filed.

On the topic of the dissertation, 2 printed works were co-authored, including 1 report in the conference proceedings, 1 patent application of Ukraine for utility model (submitted).

ROTARY KILN, PETROLEUM COKE, HIGH TEMPERATURE  
PROCESSING, NUMERICAL SIMULATION, THERMAL HYDRODYNAMIC  
AND MECHANICAL STATE, ZONE OF CALCINATION, AIR.

## РЕФЕРАТ

УДК 66.041.49:66.042.3-048.35

Магистерская диссертация «Вращающаяся печь для прокаливания нефтяного кокса с модернизацией узла подвода воздуха» / А. Н. Глухов. КПИ им. Игоря Сикорского; н.руков. А. Я. Карвацкий. Работа содержит: \_\_ с., \_\_ рис., \_\_ табл., \_\_ прил., \_\_ ссылок.

**Объект исследования:** процесс прокаливания сыпучих углеродосодержащих материалов.

**Предмет исследования:** тепло-гидродинамический и механический состояния вращающейся печи для высокотемпературной обработки нефтяного кокса.

**Цель работы:** модернизация узла подвода воздуха в зону прокаливания вращающейся печи и исследования физических полей печного оборудования для подтверждения его эксплуатационной пригодности.

**Результаты работы и их новизна.** В результате выполненных в диссертации исследований впервые получены следующие научные результаты:

- 1) Исследование физического состояния оборудования с целью определения работоспособности предложенной модернизации узла для подачи воздуха в зону прокаливания печи с использованием разработанных дискретных и континуальных численных моделей вращающейся печи в целом и ее узлов.
- 2) Анализ достоверности полученных результатов численного моделирования.

**Практическое значение полученных результатов** состоит в следующем:

- 1) Разработано 3D числовые модели для исследования физического состояния вращающихся печей базовой и модернизированной конструкций в дискретном и континуальном приближениях.
- 2) Подана заявка патент Украины на полезную модель, включающая устройство для подачи атмосферного воздуха в барабан вращающейся печи.

По теме диссертации опубликовано в соавторстве 2 печатные работы, в том числе 1 доклад в сборниках докладов конференций, 1 заявка на патент Украины на полезную модель (представлена).

ВРАЩАЮЩАЯСЯ ПЕЧЬ, НЕФТЯНОЙ КОКС, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ОБРАБОТКА, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТЕПЛО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ И МЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ, ЗОНА ПРОКАЛИВАНИЯ, ВОЗДУХ.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	4
ВСТУП .....	6
1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПРОЖАРЮВАННЯ НАФТОВОГО КОКСУ.....	8
1.1 Виробництво коксу та підготовка до прожарювання .....	8
1.2 Прожарювання коксу .....	10
2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ ДЛЯ ПРОЖАРЮВАННЯ НАФТОВОГО КОКСУ.....	27
3 ОПИС КОНСТРУКЦІЇ І ПРИНЦИП РОБОТИ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ	28
4 ПАТЕНТНО-ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПІДВОДУ ПОВІТРЯ .....	31
4.1 Результати патентного пошуку з модернізації підводу повітря для обертової печі .....	31
4.2 Вибір модернізації вузла обертової печі з підводу повітря ...	33
4.3 Обґрунтування обраної модернізації вузла обертової печі з підводу повітря .....	37
5 ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ ДЛЯ ПРОЖАРЮВАННЯ НАФТОВОГО КОКСУ.....	38
5.1 Розрахунки теплової потужності обертової печі за різної продуктивності .....	38
5.2 Визначення технологічних параметрів обертової печі з вузлом для подачі повітря в зону прожарювання базової конструкції ....	39
5.3 Визначення температурних умов діючої обертової печі з подачею вторинного повітря в зону прожарювання за даними кампанії Rain CII .....	42
5.4 Числовий аналіз температурних умов роботи сталевих жарових труб в процесі експлуатації обертової печі базової конструкції. .	43

6 МОНТАЖ І ЕКСПЛУАТАЦІЯ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ .....	51
7 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ .....	79
7.1 Опис ідеї проекту .....	79
7.2 Аналіз факторів макромаркетингового середовища .....	84
7.3 Аналіз факторів мікромаркетингового середовища .....	87
8 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	91
8.1 Техніка безпеки при роботі на обертовій печі .....	91
8.2 Характеристика видів шкідливих виробничих факторів .....	91
8.3 Необхідні вимоги до виробничих процесів та устаткування. .	92
8.4 Необхідні вимоги та попередження при роботі з устаткуванням .....	94
8.5 Повітря робочої зони .....	97
8.6 Виробниче освітлення .....	97
8.7 Електробезпека .....	98
8.8 Виробничий шум .....	100
8.9 Небезпека впливу частин установки, що рухаються й обертаються .....	101
8.10 Пожежна безпека .....	101
9 МОДЕРНІЗАЦІЯ ВУЗЛА ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ З ПІДВОДУ ПОВІТРЯ .....	104
9.1 Розробка 3D моделей базової і модернізованої конструкцій вузла обертової печі з підводу повітря .....	104
9.2 Числові моделі та результати розрахунків фізичного стану базової та модернізованої конструкцій вузла обертової печі з підводу повітря. Визначення критичних параметрів .....	108
9.3 Підтвердження працездатності модернізованого вузла обертової печі з підводу повітря .....	125
9.4 Аналіз достовірності отриманих результатів .....	127
ВИСНОВКИ .....	133



ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	136
ДОДАТОК А. КРЕСЛЕННЯ І ПЛАКАТИ .....	
ДОДАТОК Б. СПЕЦИФІКАЦІЇ .....	
ДОДАТОК В. Код ПЗ LIGGGHTS для числового моделювання динаміки сипкого матеріалу в обертівій печі з системою підводу повітря в зону прожарювання .....	
ДОДАТОК Г. КОПІЇ ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ .....	

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Умовні позначення:

$D$  – діаметр, м;

$E$  – модуль пружності, Па;

$f$  – площа поперечного перерізу,  $\text{м}^2$ ;

$L$  – довжина, м;

$N$  – потужність, Вт;

$n$  – частота обертання, об/хв;

$P$  – продуктивність, т/год;

$P$  – навантаження, Н;

$p$  – тиск, Па;

$Q$  – теплота, Дж/ $\text{м}^3$  ;

$T$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$U$  – прогин, мм,

$V$  – швидкість, м/с;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ;

$\delta$  – товщина футеровки, мм;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{K}$ ;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона,

$\rho$  – щільність,  $\text{кг}/\text{м}^3$  ;

$\sigma$  – напруження, Па.

Скорочення:

APDL – ANSYS Parametric Design Language;

CAD – computer aided design;

LIGGGHTS – LAMMPS improved for general granular and granular heat transfer simulations;

ДС – державний стандарт;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

НДС – напружено-деформований стан;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПрАТ – приватне акціонерне товариство;

СН – санітарні норми;

СНіП – будівничі (строительные) норми і правила;

ССЕ – складні структурні елементи.

## ВСТУП

У магістерській дисертації розглянуто обертову піч для прожарювання нафтового коксу з модернізацією вузла підводу повітря. Реалізація вказаної модернізації дає змогу практично відмовитися від використання природного газу для підтримки температурного режиму печі, підвищити рівномірність температурного поля та відповідно однорідність фізичних властивостей термооброблюваного нафтового коксу. Звідки витікає, що тема зазначеної дисертації є безумовно актуальною.

Об'єкт дослідження – процес прожарювання сипких вуглецевмісних матеріалів.

Предмет дослідження – тепло-гідродинамічний та механічний стан обертової печі для високотемпературного оброблення нафтового коксу.

Мета роботи: модернізація вузла підводу повітря в зону прожарювання обертової печі та дослідження фізичних полів пічного обладнання для підтвердження його експлуатаційної придатності.

Обертові печі призначені для нагрівання матеріалів з метою їх фізико-хімічної обробки.

Обертові печі бувають: нагрівальні, в яких металеві заготовки обробляють для кування і штампування; термічні, де металеві вироби піддають термічній обробці; випалювальні, застосовувані для випалу клінкеру, руд, нерудних матеріалів і залізрудних окатишів тощо.

Матеріали, у технологіях отримання яких використовуються обертові печі, включають: цемент, вапно, вогнетривкий матеріал, мета каолін, двоокис титану, алюміній, вермікуліт, залізрудні окатиші.

Принцип роботи обертової (трубчастої) печі полягає в своєму повільному обертанні навколо своєї осі (по структурі це циліндрична пустотіла конструкція, яка трохи нахилена до горизонту). Вона повільно обертається навколо своєї осі. Матеріал, що обробляється, завантажується у верхній кінець циліндра. Так як піч обертається, матеріал повільно рухається у напрямку до

нижнього кінця та може при цьому перемішуватися. Гарячі гази проходять крізь піч, іноді в тому ж напрямку що і оброблюваний матеріал (попутний потік), але зазвичай у зворотному напрямку (зустрічний потік). Гарячі гази можуть бути створені у зовнішній топці, або можуть бути створені факелом всередині печі. Такий факел створюється пальником, що працює за принципом пальника Бунзена. Паливом для нього може бути газ, мазут, або порошкове вугілля.

Високотемпературне оброблення сипучих матеріалів є одним із найважливіших підготовчих процесів у різних областях хімічних, металургійних та інших виробництв. Зокрема прожарювання вуглецевої сировини є одним із перших етапів під час виробництва електродної продукції. Підчас прожарювання з матеріалу видаляється волога й летючі, а також здійснюється його усадка та стабілізація фізичних властивостей.

Нагрівання вуглецевої сировини може відбуватися за рахунок теплоти згоряння хімічних речовин, кондуктивного чи конвективного теплообміну та через виділення джоулевої теплоти, при проходженні крізь матеріал електричного струму. Останній спосіб є найбільш привабливим через високу його ефективність та контрольованість, можливість проводити процес за температури понад 2000 °C, незначні втрати матеріалу через вигорання.

# 1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПРОЖАРЮВАННЯ НАФТОВОГО КОКСУ

## 1.1 Виробництво коксу та підготовка до прожарювання

Виробництво коксу з кам'яного вугілля супроводжується виділенням попутного продукту процесу коксування – коксового газу. Сирий коксовий газ, що виходить з коксових печей, містить у своєму складі певні хімічні речовини, які виділяються з газу і переробляються в товарну продукцію або утилізуються в хімічних цехах. До цих хімічних речовин відносяться: смола кам'яновугільна, бензолні вуглеводні, аміак, сірководень.

Необхідність очищення коксового газу від хімічних речовин диктується також умовами використання його як технологічне та енергетичне паливо.

Нижче наводиться опис перспективних проектних робіт, що виконуються по хімічних цехах коксохімічного виробництва.

1) Традиційні технологічні схеми виділення з коксового газу аміаку і сірководню передбачають роздільні процеси з використанням хімічних реагентів і отриманням товарних продуктів.

Для видалення аміаку з коксового газу використовується сатураторний або безсатураторний метод із застосуванням 3-12%-го розчину сірчаної кислоти ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) і отриманням готового продукту – сульфату амонію  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , який є добривом.

Для видалення сірководню з коксового газу використовується вакуумкарбонатний або моноетаноламіновий метод із застосуванням соди  $(\text{Na}_2\text{CO}_3)$  або моноетаноламіну технічного  $(\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH})\text{NH}_2$  з отриманням, як правило, сірчаної кислоти, яка потім направляється на виробництво сульфату амонію.

Комплексне очищення коксового газу від аміаку  $(\text{NH}_3)$  і сірководню  $(\text{H}_2\text{S})$  круговим методом, є високоефективним технічним рішенням, що дозволяє об'єднати два технологічних процеси (виділення аміаку і виділення сірководню) в один. При цьому аміак уловлюється циркулюючою водою, а

сірководень з газу витягується насиченою аміаком водою. У цій технології не застосовуються спеціальні хімічні реагенти. Очищення коксового газу забезпечується до необхідних нормативних показників: аміаку – до 0,03 г/нм , сірководню – до 0,5 г/нм.

2) Традиційні технології забезпечують норматив 0,5 г/нм сірководню в очищеному газі, що відповідає чинним в Україні нормам і правилам. На вимогу деяких українських і закордонних металургійних підприємств, що використовують коксовий газ як енергетичне паливо, коксохімічні виробництва повинні забезпечити його чистоту за вмістом сірководню  $< 0,5$  г/нм. Обидві описані вище технології (1 і 2) відносяться до заходів охорони навколишнього повітря від забруднень.

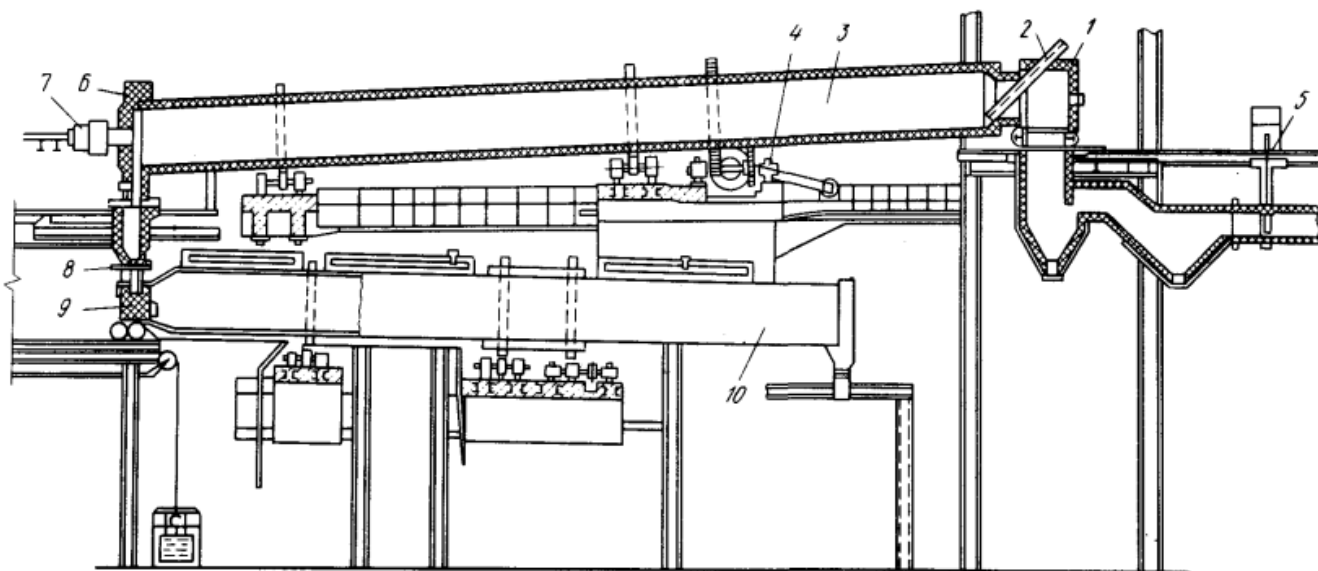
3) У хімічних цехах коксохімічних виробництв використовується різне обладнання: скрубери (абсорбери), газові холодильники трубчасті і холодильники безпосередньої дії, механізовані освітлювачі для води і смоли, електрофільтри для очищення газу від смоли, резервуари, ємності та багато іншого обладнання, яке відноситься до обладнання індивідуального виготовлення.

В даний час розробляється документація на скрубери (абсорбери) для очищення коксового газу від аміаку, сірководню, бензольних вуглеводнів продуктивністю до 160 тис. нм<sup>3</sup>/год. для єдиного газового потоку. Виконуються проекти іншого обладнання. Розробка устаткування підвищеної одиничної потужності дозволяє скоротити територію забудови, зменшити кількість обслуговуючих майданчиків, а відповідно і витрату матеріалів на їх виготовлення та монтаж, знизити експлуатаційні витрати.

## 1.2 Прожарювання коксу

Обертові барабанні печі [23] – цей тип печей найбільш широко поширений при виробництві різних електродних виробів і анодної маси. Печі мають високу продуктивність, для їх обслуговування потрібно нечисленний персонал. Крім того, можливо автоматизувати роботу всього переділу прожарювання, обладнаного обертовими печами. До недоліків таких печей слід віднести лише великий чад вуглецю (до 8%).

На рисунку 1.1 приведена обертається прожарювальна піч. Вона представляє собою довгий барабан, встановлений з ухилом 2,5-5% і обертається зі швидкістю 1-5 об/хв, за рахунок чого завантажений матеріал пересувається від одного кінця до іншого.



- 1 – холодна головка; 2 – завантажувальна труба; 3 – барабан печі;  
4 – привід печі; 5 – шибер; 6 – гаряча головка; 7 – пальник;  
8 – пісочний затвор; 9 – гаряча головка холодильника; 10 – холодильник

Рисунок 1.1 – Обертова прожарювальна піч

Основні конструктивні елементи печі: корпус, опори, привід головок, пальники, ущільнювальні пристрої, футеровка та термоізоляція.

Верхнім кінцем барабан з'єднаний з холодною (задньою) голівкою, яка через систему кнурів з'єднана з димарем для відводу газів, що відходять. Крізь



цю головку проходить сталевая охолоджуюча водою труба, через яку проводиться завантаження матеріалу в піч. З протилежного боку барабан з'єднаний з гарячою (передній) голівкою, в якій встановлені пальники для спалювання палива. Матеріал з барабана надходить в передню головку, в нижній частині якої є отвір, поєднане з холодильником, розташованим під барабаном. Холодильник являє собою обертовий сталевий барабан, охолоджуваний зовні водою. Холодильник обертається зі швидкістю 5-8 об/хв, його нахил до горизонту 3-5%. Холодильник також з обох кінців з'єднаний з головками, через які в нього надходять гарячі матеріали і виходять після охолодження. Головки печі і холодильника встановлені на рейках, щоб при ремонті і огляді головки можна було відкотити від печі. Конструкція печі в цілому - досить жорстка, забезпечує узгодженість теплового розширення окремих елементів, а також виключає можливість перегріву металу. Виконання цих умов має вирішальне значення для збереження металевої частини і особливо футерування печі, що є найбільш слабким елементом конструкції печі.

Обертові печі характеризуються високою продуктивністю і надійністю в експлуатації. Найважливішим гідністю обертових печей є відносна рівномірність температури прожарюємо матеріалів, обумовлена його пересипанням. Рівномірний прожарювання забезпечує високу якість продукції.

### 1) Корпус

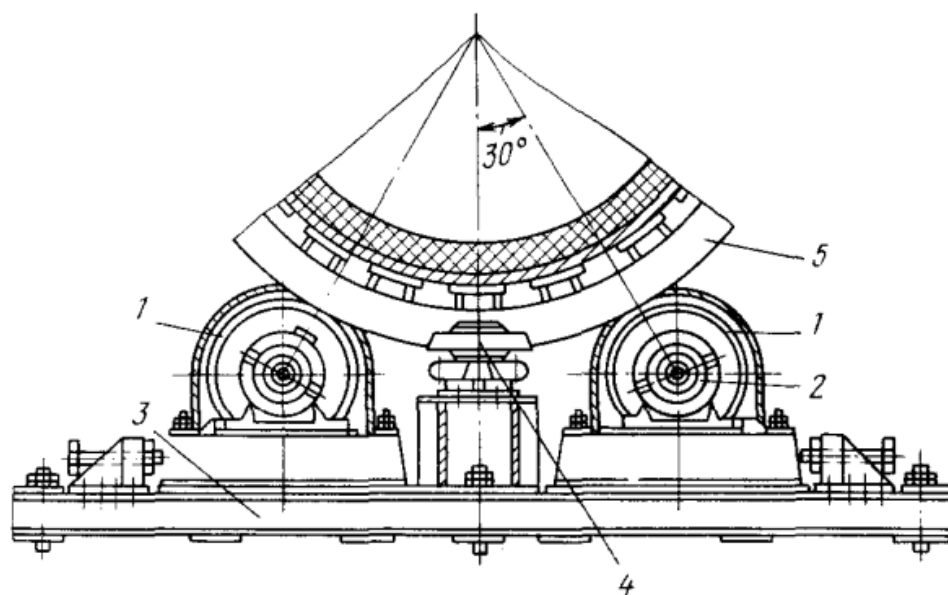
Барабан складається з ряду коротких циліндричних царг, зварених із сталевих листів (зазвичай сталь 3); царги між собою зварені встик. Поздовжні шви окремих царг зрушені один щодо одного та розташовані уздовж обичайки по гвинтовій лінії. У перетинах над опорами і в перерізі кріплення вінцевої шестерні (зубчастий вінець) поперечні шви не допускаються.

Барабан печі спирається на ролики бандажами, які представляють собою сталеві литі кільця зі спеціальної твердої сталі. Число бандажів залежить від довжини барабана і приймається зазвичай з розрахунку один бандаж на 15 - 18 м довжини барабана. Для збільшення поперечної жорсткості барабана між

бандажами змонтовані кільця жорсткості з радіальними зазорами між корпусом і кільцем. У гарячому стані барабан печі розширюється, що призводить до ліквідації зазору і щільної посадки кільця на барабан. Для обмеження переміщення барабана уздовж осі по обидва боки середнього бандажа встановлені контрольні ролики.

Корпус обертової печі між точками опори працює на вигин. Товщина корпусу і відстань між опорами визначаються допустимою напругою вигину; число опор знаходиться в прямій залежності від діаметра барабана.

## 2) Опори (рисунок 1.2)



1 – ролики; 2 – підшипники ковзання; 3 – опорна плита;  
4 – упираючий ролик; 5 – опорні бандажі

Рисунок 1.2 – Опори

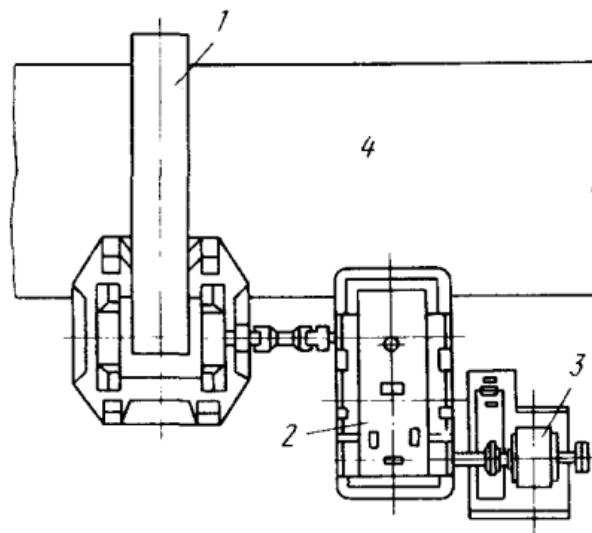
Кожна опора складається з двох роликів 1, встановлених в підшипниках ковзання 2. Ролики - сталеві литі, а осі роликів - ковані. Підшипники разом з роликами можуть переміщатися по опорним плитам 3. У тому випадку, коли кут між лініями, що з'єднують центр окружності барабана печі з центрами роликів дорівнює 60%, вони відчують мінімальний тиск. Ролики встановлені на фундаментних опорах таким чином, що печі мають нахил до горизонту 2,5-5%.

Опорні бандажі 5 відливають або вальці з твердої сталі. Вальцьовані сталеві бандажі за якістю краще литих. Ширина бандажа визначається навантаженням на опору. Опорні ролики відливають або виковують з менш твердої сталі, ніж бандажі. Цим забезпечується тривала служба більш дорогих деталей - бандажів. У зв'язку з тим, що піч має ухил, при обертанні барабан може ковзати по ухилу. Щоб барабан не зійшов з опорних роликів, по осі печі встановлений упираючий ролик 4, що впирається в торець бандажа.

### 3) Привід

Привід сучасних обертових печей здійснюється через редуктор і одну відкриту вінцеву шестерню (зубчастий вінець). Сталева вінцева шестерня встановлена на корпусі печі і зазвичай складається з двох частин. Кріплення цієї шестерні на корпусі печі конструктивно може бути виконано по-різному, але у всіх випадках враховується теплове розширення печі. Вінцева шестерня завжди розташовується у бандажа, забезпеченого обертovими на вертикальних осях напольгливими роликами 4 (див. Рисунок 1.2).

На рисунку 1.3 показана конструкція приводу.



1 – вінцева шестерня; 2 – редуктор; 3 – двигун; 4 – барабан печі

Рисунок 1.3 – Привід

Привід складається з двигуна, редуктора і зубчастої передачі. Мала шестерня зубчастої передачі з'єднана з редуктором шарнірно, щоб цю

шестерню для зручності настройки зачеплення можна було переміщати на опорній плиті разом з підшипниками.

#### 4) Холодильник

Опори і привід барабана холодильника влаштовані аналогічно таким пічного барабана. Для запобігання холодильника від передчасного зносу, оскільки в нього надходить матеріал, нагрітий до 1100-1200 °С, передня частина його на довжину близько 4м футерована вогнетривкою цеглою. Отже, на цій довжині скорочено активне охолодження матеріалу в холодильнику. Експлуатуються також холодильники, у яких замість футерування організовано інтенсивне охолодження. Щоб знизити вплив високої температури матеріалу на метал, з якого виготовлений холодильник, створено пристрій, який дозволяє швидко пересувати гарячий матеріал з цієї зони. До внутрішньої стінці холодильника в передній його частині на довжині 1,5м приварена двозахідна спіраль, за допомогою якої матеріал швидко пересувається в зону інтенсивного охолодження. Крок спіралі 400мм, висота 250мм, тобто при одному обороті барабана матеріал пересувається на 400мм.

У протилежному кінці холодильника є розвантажувальний пристрій, яке не тільки видає охолоджений матеріал, але і герметизує холодильник. На жаль, герметизація недостатня і великі кількості повітря надходять в холодильник і далі в пічної барабан, що приводить до згорання матеріалу.

#### 5) Футерування печі

Для запобігання металевому корпусу печі від впливу високих температур його футерують спеціальними вогнетривкими матеріалами. Разом із захисними функціями футерування бере участь в тепловій роботі печі, знижуючи теплові втрати в навколишній простір. В процесі роботи печі футерування нагрівається розпеченими газами до температур, що перевищують температуру прожарюємо матеріалів, і за один оборот печі стикається всією поверхнею з контактують шаром матеріалів. В результаті футерування є теплообмінних регенератором - вона передає матеріалу випромінюванням і теплопровідністю певну частину

тепла, що прискорює загальний процес прожарювання. Теплові втрати в навколишній простір залежать від теплопровідності і товщини застосовуваного вогнетрива. Теплові втрати можуть бути знижені не тільки в результаті збільшення товщини вогнетривкої кладки, а й застосування спеціальних теплоізолюючих матеріалів, покладених між корпусом печі та вогнетривом.

Не завжди вогнетривкість є визначальною властивістю. Вибираючи вогнетривкий матеріал для різних частин печі, слід враховувати не тільки дію високих температур, а й механічне зношування, руйнівну дію золи або газів.

Для футеровки обертових печей застосовують шамотна і хромомagneзитового вогнетриви. Хромомagneзитового вогнетривом футерують ділянки печі, схильні до дії високих температур (від передньої головки до кінця зони прожарювання). У зоні нижчих температур, особливо при наявності вологи в матеріалах, відбувається швидке руйнування футеровки з хромомagneзитового цегли. Тому цю ділянку печі футерують шамотним вогнетривом. Однак і шамотна вогнетрив в цих умовах не є ідеальним футерувальним матеріалом, бо слабо протистоїть механічному зносу (стирання).

Футеровка в гарячій зоні проводиться в два шари: перший шар складається з легкого шамоту, другий – з хромомagneзитового цегли. Перший шар викладають стрічковим способом на шамотовий розчині; товщина поздовжніх і поперечних швів 1-2мм. Кладку другого шару виробляють з перев'язкою поперечних швів, зміщуючи сусідні ряди на пів цеглини відносно один одного, і поздовжніми прямолінійними рядами уздовж твірної циліндра корпусу печі; товщина радіальних швів 1,5-2мм. Через кожен метр кладки залишають температурний шов в 10мм.

У зв'язку з високими температурами відхідних з печі газів велике значення має конструкція обмежувального кільця на холодному обрізі барабана печі. Це кільце не дає висипатися матеріалу, що подається через завантажувальну тічку. Однак виготовляється промисловістю обмежувальне кільце не розраховане на роботу при температурах вище 400-500 °С, і при високих температурах газів, що відходять встановлюють обмежувальні кільця,

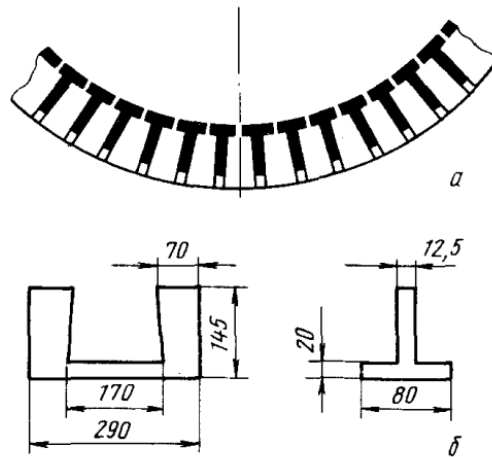
виготовлені на основі високо глиноземисті цементу. Розвантажувальний кінець печі має поріг у вигляді підпiрного кільця з жаростійкої сталі або футерований цеглою для утримання оброблюваного матеріалу на певному рівні.

Футеровка повинна витримувати теплове розширення печі, бути механічно досить міцною і щільно прилягати до корпусу печі, в іншому випадку вона передчасно зруйнується. У діючій обертової печі внаслідок теплового розширення футеровки, укладеної в жорсткий корпус, створюється динамічна рівновага між розтягується корпусом і стиснутою футеровкою. Напруга футерування при інших рівних умовах зростає з підвищенням її температури і зниженням температури корпусу. Так як температура по товщині футеровки змінюється, то більш нагрітої частини цегли відповідає найбільшу напругу. Якщо міцність цегли недостатня, то він сколюється шарами з внутрішньої поверхні футеровки.

Напруга футерування, що викликається тепловим розширенням, можна зменшити за допомогою еластичних швів. Товщину швів слід розраховувати на підставі даних про тепловому розширенні цегли. Правильний розрахунок ширини швів має, таким чином, дуже істотне значення: якщо шов дуже вузький, то цегла сколюється; якщо шов надмірно широкий, то окремі цеглини можуть випасти з кладки.

Знос вогнетривів під час експлуатації печі відбувається головним чином внаслідок стирання, а також з-за теплових ударів і хімічного руйнування поверхні кладки розплавленою золою. Відзначено, що при прожарюванні високо зольних матеріалів (антрациту, ливарного коксу) футерування зношується інтенсивніше. Характер зносу футеровки по довжині печі неоднаковий. У зоні підігріву при попаданні в піч вологих матеріалів може відбувається розтріскування і руйнування цегли. У зоні прожарювання футерування руйнується в основному внаслідок хімічної взаємодії. розплавленої золи з вогнетривом. Однак останні фактори менш значущі і тільки сприяють збільшенню зносу в результаті стирання. Наприклад, шамотна футеровка при прожарюванні антрациту за 45 діб зношується на 200мм, а при прожарюванні нафтового коксу - за 80-90 діб.

До передчасного зносу футеровки печі призводять і порушення технологічного режиму. Наприклад, при короткочасних зупинках матеріал з печі не вивантажують, що призводить до перегріву окремих ділянок кладки і корпусу печі. При тривалих зупинках матеріал вивантажують, і кладка швидко охолоджується. Все це призводить до псування кладки і скорочення термінів її служби.



*a* – футеровка печі; *б* – башмак; *1* – корпус печі;

*2* – вогнетривка кладка; *3* – башмак

Рисунок 1.4 – Установка металлических башмаків в футеровці печі

Найбільш слабким ділянкою футеровки є шамотна її частина, і частіше потрібен капітальний ремонт в результаті її зносу. Для збільшення термінів служби шамотної футеровки (холодного кінця) розроблені способи захисту її від швидкого зносу. Найбільш простий спосіб полягає в покритті верхнього шару футеровки сталевими листами. Інший спосіб складніший, але також надійний: при футеровці печі в кладку закладають футеровочний черевик (рисунок 1.4), виготовлений з жаростійкого чавуну типу силка. Башмаки закладають в шви між клиновими шамотною цеглою, в результаті чого по всій поверхні футеровки виходить захисна броня.

#### б) Режим роботи печі

Прожарюють різні за властивостями вуглецеві матеріали. Наприклад, нафтового коксу містять близько 7% летючих речовин, здатних згоряти,

антрациту – 3-4%, а пекові кокси – близько 1%. Антрацит - щільний матеріал і володіє високими абразивними властивостями, кокси ж пористі і менш абразивні. Властивості сировинних матеріалів, особливо вміст летких речовин, сильно впливає на режим роботи печі.

Відповідно до послідовним ходом технологічних перетворень при прожарюванні вуглецевих матеріалів всю довжину печі слід розділити на три зони. Перша - зона підсушування та підігріву газами. Це найдовша зона, в якій прагнуть повніше використовувати тепло відхідних газів. Температура на початку зони близько 1100 °С, а в кінці – близько 500-600 °С, чим коротше піч, тим вище температура газів, що залишають її. Друга – зона прожарювання, має найбільшу температуру газового потоку (1300-1400 °С). Матеріал нагрівається в ній до 1250-1300 °С. Довжина зони прожарювання визначається довжиною факела палаючого газу і зазвичай складає близько 5м. Якщо в прожарюємо матеріалах міститься велика кількість летючих (нафтовий кокс), то в результаті їх горіння зона прожарювання може зрости до 12-15м. Третя – зона охолодження. Це найкоротша зона, вона розташована в передній частині печі перед факелом палаючого палива. Нормальною довжиною для цієї зони слід вважати 2-3м. Однак в залежності від стану зони прожарювання, яка може пересуватися як в одну, так і в іншу сторону печі, довжина зони охолодження може і скорочуватися до 1м, і збільшуватися до 5-6м. Це порушення технологічного режиму, а тому неприпустимо.

Найбільш відповідальною є зона прожарювання, від довжини і розташування якої залежить якість прожарювання, величина чаду. У разі найбільшого видалення зони прожарювання від гарячої головки печі різко зростає угар матеріалу, так як надходить в піч надлишок повітря, необхідний для спалювання летучих речовин, проходячи над шаром вже прожарювального і нагрітого до 1200 °С матеріалу, спалює його. Чим довше ця ділянка, тим більше згорає матеріалу і більш збіднений киснем повітря надходить в зону прожарювання. Через нестачу кисню виділилися летючі речовини повністю не згорають в лікуй, а догорають в кінці її, куди разом з завантажувальним



матеріалом надходить повітря. Іноді летючі догорають за межами печі; при цьому спостерігається різке підвищення температури газів, що відходять.

Подовження зони прожарювання є позитивним фактором, так як створюються умови для більш тривалого перебування матеріалу при найбільш високій температурі в печі і, отже, більш швидкого і кращого прожарювання. При великій довжині зони прожарювання може бути збільшена продуктивність печі, для цього потрібно лише збільшити швидкість руху матеріалу за рахунок збільшення числа оборотів печі.

До параметрів технологічного режиму печі відносяться також обсяг завантаження печі матеріалом, швидкість руху матеріалу, температура і тягові умови.

Обсяг завантаження залежить від діаметра печі і складає 6-15% її обсягу; чим більше діаметр печі, тим менше повинен бути коефіцієнт заповнення. При внутрішньому діаметрі печі близько 1м коефіцієнт заповнення допускається 12-15%, а при діаметрі 2,5-3,5 – до 6-8%. При занадто високому коефіцієнті заповнення печі погіршуються умови прожарювання, пересування матеріалу і тепловіддача футерування, чому корпус печі перегрівається, а якість прожарювання знижується. Однак при зменшенні коефіцієнта заповнення печі зменшується її продуктивність. Для створення сприятливих умов управління режимом і стабільної якості прожарювання коефіцієнт заповнення при експлуатації печі повинен бути постійним. Тому піч повинна бути обладнана точними дозаторами. Оскільки дозатори об'ємного дії, для сталості масової завантаження потрібно сталість гранулометричного складу вступників в піч матеріалів. Особливу увагу слід звертати на максимальну крупність матеріалу, яка не повинна перевищувати 40мм.

Час перебування матеріалу в печі в основному визначається її розмірами, температурним режимом і властивостями прожарюємо матеріалів. Наприклад, для нафтового коксу, розміри шматків якого досягають 50мм, при нормальному коефіцієнті завантаження і робочій температурі близько 1400 °С час перебування в зоні прожарювання має бути не менше 20хв. У промисловій практиці в печах довжиною 40-45м загальний час перебування матеріалу в печі.

Для раціонального ведення режиму прожарювання необхідно, щоб на печах була гнучка система регулювання розрідження в межах 1-20 Па. При нормальних умовах роботи печі розрідження в її холодній голівці становить 2-5 Па. Зазвичай для зменшення виносу матеріалу з печі прагнуть працювати на мінімально допустимому розрідженні. Величина розрідження на печі впливає і на стан зони прожарювання. При недостатній тязі зона прожарювання опускається до передньої голівці печі і, навпаки, при збільшенні тяги, вона віддаляється від неї.

#### 7) Теплообмін в печі

Механізм процесу теплообміну під обертової печі при прожарюванні вуглецевих матеріалів вельми складний, так як схильний до впливу багатьох чинників, наприклад, процесів горіння палива, хімічних процесів, спалювання летучих речовин, що виділяються при прожарюванні, обертання теплового агрегату.

Обертові прожарювальні печі працюють за принципом відкритого нагріву, при якому палаючий смолоскип і рухомі димові гази безпосередньо стикаються з поверхнею прожарюємо матеріалів.

Палаючий факел має осі печі, випромінює поверхню і довжина якого визначають зону прожарювання. Специфічним для теплообміну в обертових печах є нестационарний процес теплової роботи футеровки, яка протягом кожного обороту печі спочатку сприймає тепло від газового потоку, а потім віддає його при зіткненні з матеріалом. У перший період температура футеровки підвищується, в другій - знижується. Середня температура футеровки - нижче середньої температури газу і вище середньої температури матеріалу. Газовий потік віддає тепло випромінюванням і конвекцією відкритих поверхнях матеріалу і футеровці, а також газів, що виділилися з прожарюємо матеріалів. Футеровка в свою чергу віддає отримане тепло відкритій поверхні матеріалу випромінюванням, закритою поверхні - теплопровідністю і в навколишнє середовище - випромінюванням і конвекцією.

Передача тепла теплопровідністю залежить від температури, вмісту летких речовин, вологості, пористості і інших властивостей нагрівається матеріалу. Конвекційний обмін залежить головним чином від швидкості руху теплоносія. У зоні високих температур основним видом передачі тепла на поверхню нагрівається матеріалу є випромінювання.

При нагріванні матеріалів в робочому просторі печі розрізняють зовнішній теплообмін, що характеризує процес передачі тепла від газового середовища і внутрішніх поверхонь печі до поверхні, що нагрівається матеріалу, і внутрішній теплообмін, що характеризує процес передачі тепла від поверхні матеріалу у внутрішні шари, а рівномірність прогріву його по товщині. Тепло, що отримується зовнішньою поверхнею матеріалу, поширюється всередину теплопровідністю завдяки різниці між температурами поверхні і внутрішніх шарів в шматку матеріалу. Так як шари матеріалу під оберткової печі безперервно пересипаються, то в різні періоди часу нагріваються різні шари матеріалу: деякий час нагрівається відкрита поверхня шару, в інший період часу - матеріал всередині шару, а частина часу матеріал нагрівається при зіткненні з футеровкою. Процеси нагрівання шматків матеріалу на футеровці і на поверхні шару відрізняються один від одного. Найбільш інтенсивний нагрів матеріалу на поверхні шару, менш інтенсивно нагрівається матеріал, що знаходиться на футеровці печі, а нагрів матеріалу в шарі найменш інтенсивний, так як теплообміну майже не відбувається через малу теплопередачі між шматочками матеріалу. При такому нагріванні пересипати шари матеріалу безперервно відбувається вирівнювання температури по товщині шару.

В цілому теплообмін в шарі при обертанні печі залежить від ступеня заповнення її матеріалом, швидкості обертання, кута нахилу і діаметра печі. Інтенсивність теплообміну в шарі матеріалу тісно пов'язана з умовами зовнішнього теплообміну, що відбувається між газовим середовищем, палаючим факелом і поверхнями футерування і матеріалу.

Для досягнення максимального теплового ефекту при прожарюванні вуглецевих матеріалів в оберткових печах необхідні певні довжина, ступінь

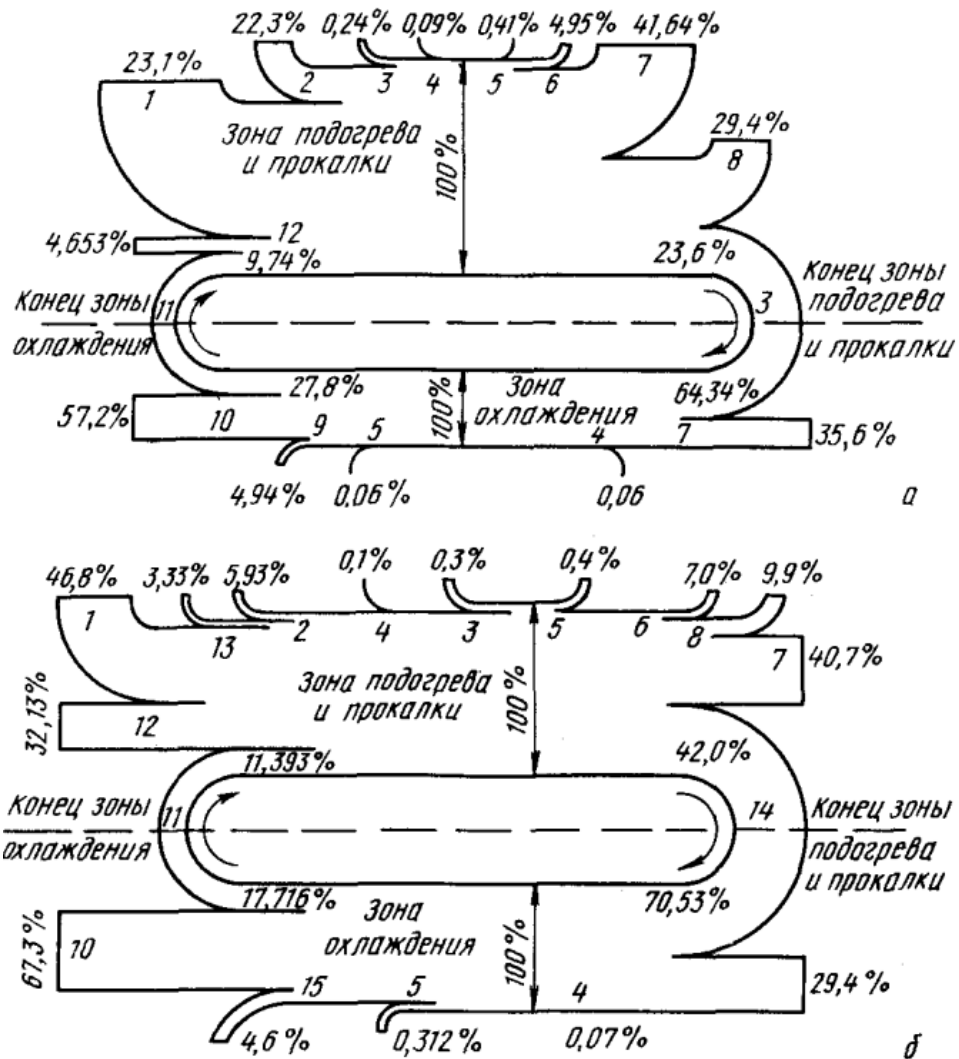
розкриття і температура факела в зоні прожарювання. Факел повинен бути не гострим, а довгим.

Для інтенсифікації зовнішнього теплообміну між гарячим газовим потоком, футеровкою і прожарюють матеріалами має важливе значення застосування світиться паливного факела при спалюванні газоподібного та рідкого палива в обертових печах. Світність полум'я істотно зростає при наявності в ньому дисперсного сажистого вуглецю, що виходить при розкладанні вуглеводневих сполук. Найдрібніші частинки сажі в світиться полум'я підсилюють передачу тепла випромінюванням.

#### 8) Теплова характеристика роботи печей

На рисунку 1.5 наведені теплові баланси обертової печі при прожарюванні різних матеріалів. У першому випадку (рисунк 1.5, а) прожарювали суміш нафтового коксу з пекового, а в другому – тільки пековий кокс. Вміст летких речовин в пекового коксу близько 1%, а в нафтовому 7%.

При прожарюванні суміші коксів ККД печі становив 24%, а при прожарюванні пекового коксу він підвищувався до 42%. Настільки різке коливання ККД печі пояснюється тим, що при складанні теплового балансу печі враховано тепло, отримане від спалювання виділяються летючих речовин в печі. Як впливає з теплового балансу, це - досить велика величина (22,3%) від усього тепла, що надійшов в піч; при прожарюванні пекового коксу ця величина складає 3,3%. Крім того, в відхідних продуктах горіння, що також впливає з теплових балансів, міститься велика кількість незгорілих горючих газів. При прожарюванні сумішей з нафтовим коксом ці втрати досягають надзвичайно великих величин і складають 41,6%, при прожарюванні пекового коксу вони значно нижчі і складають близько 10%. Пояснюється це тим, що до цих пір не розроблений спосіб повного спалювання летучих речовин, що виділяються в печі. Правильніше було б сказати, що не розроблений спосіб підведення повітря, необхідного для спалювання летучих речовин в зоні підігріву і прожарювання.



1 – хімічне тепло згорілого матеріалу; 2 – хімічне тепло летучих; 3,14 – фізичне тепло матеріалу; 4 – фізичне тепло повітря; 5 – нев'язка балансу; 6 – втрати в довкілля; 7 – хімічне тепло вихідних продуктів; 8 – фізичне тепло вихідних продуктів; 9 – фізичне тепло коксу; 10 – втрати тепла з водою і в довкілля; 11 – хімічне та фізичне тепло вихідних продуктів горіння; 12 – хімічне та фізичне тепло газу; 13 – хімічне та фізичне тепло палива; 15 – фізичне тепло вивантажувальних продуктів

Рисунок 1.5 – Обертова прожарювальна піч

Введене в піч повітря, пройшовши через розпечений шар матеріалу в зоні охолодження і в кінці зони прожарювання, втрачає стільки кисню, що в ньому летючі речовини зони підігріву не згорають або згорають в незначній мірі. Але при завантаженні матеріалу в піч надходить і холодне повітря, в результаті чого відбувається згорання летючих речовин, які не згоріли в печі. Але отримане при

цьому тепло не впливає на процес прожарювання, так як виділяється за межами печі і утилізується в заводській котельні.

У холодильнику матеріал охолоджується до 80-100 °С. Барабан холодильника постійно зрошується холодною водою. Витрата води становить 50-60м<sup>3</sup>/год, або близько 15м<sup>3</sup> на 1т прожарювального коксу. Через розвантажувальну негерметизовану течку холодильника безперервно підсмоктується холодне повітря, яке, пройшовши вздовж холодильника, потрапляє в зону досить високих температур, сприяючи згорянню матеріалу. У холодильнику згорає прожарювальний кокс 80-100кг/год. Таким чином, в холодильнику спостерігаються два протилежні процеси, один з яких сприяє нагріванню матеріалу, а інший – його охолодження.

З теплового балансу холодильника слід, що хімічне тепло чаду матеріалу становить 30-40% від загальної кількості тепла, що надходить в холодильник, а тепло, що відводиться водою, і втрати в навколишній простір – 65-70%. Це означає, що на деякій довжині холодильника матеріал зовсім не охолоджується, а тільки відбувається відбір тепла, отриманого за рахунок згорання матеріалу.

Щоб уникнути таких величезних втрат (при згорянні) пропечений коксів в холодильнику, необхідно створити герметичне розвантажувальний пристрій або створити газову завісу по шляху руху матеріалу (в переході між барабаном печі і холодильником), що перешкоджає підсосу повітря.

#### 9) Втрати матеріалів при прожарюванні

У процесі прожарювання багато матеріалів втрачається внаслідок згорання вуглецевої частини і механічного виносу тонкоподрібнених частинок матеріалів (пилеунос). Для обертових прожарювальних печей характерний високий угар найціннішої частини матеріалу – вуглецю: в середньому згорає близько 10% вуглецю, але іноді ця величина досягає 15% (угар вуглецю в ретортних прожарювальних почках 1%, рідко – до 3% при зношених ретортах). Більшою мірою угар матеріалів відбувається через підсосів повітря, тобто через відсутність належної герметизації печі. На величину чаду вуглецю, крім підсосу

повітря, впливає також порядок і умови ведення теплового режиму і спалювання летучих речовин.

При перевезенні, подрібненні і русі матеріалу в печі відбувається його стирання - освіту пилоподібних частинок, розміри яких менше 0,5-1мм. Ступінь стирання залежить від природи матеріалу і довжини печі і не залежить від числа обертів її, діаметра і кута нахилу. Збільшення коефіцієнта завантаження печі також сприяє стирання. Пилеунос тонких фракцій, одержуваних в результаті стирання, залежить в основному від розрідження в печі. При прожарюванні пекового коксу пилеунос становить 1,2-2,0%, а при прожарюванні нафтового коксу (кубового коксування) зростає до 2,9-3,2 пилеунос антрациту в цих же умовах становить лише 0,6-0,7%, так як цей матеріал дуже стійкий проти стирання.

Пилеунос різко зріс після того, як нафтовий кокс стали виробляти способом сповільненого коксування (замість кубового способу). Цей кокс дуже неміцний і схильний до легкого стирання, в результаті чого утворюється велика кількість тонких пилових фракцій, що чинить негативний вплив на ефективність роботи обертових печей. Так при прожарюванні нічого не класифікованої по крупності коксу, що містить близько 50% фракції менше 25мм, продуктивність печей знижується на 30%, а втрати при прожарюванні зростають на 50% за рахунок пиловиносу з печі.

Для збору захоплених з печі запорошених фракцій за піччю споруджують скрубери (іноді його називають піроскрубер), в яких ці фракції осідають. Скрубери являють собою гравітаційну відстійну камеру прямокутного перетину з входом газів з одного боку і виходом - з іншого (збоку або зверху). Недоліками цих скрубери є великі габарити і низька ефективність пиловловлення. При заданій витраті запиленого газу ефективність уловлювання залежить від загальної площі камери і майже не залежить від висоти. Перетин камери вибирають так, щоб швидкість газу була невеликою і щоб не відбувалося захоплення обложеної пилу. У всіх випадках швидкість не повинна перевищувати 3м/с.

Так як скрубери не забезпечують повного очищення газів від пилу, то вона надходить в котли-утилізатори, ускладнюючи їх експлуатацію. Для очищення відпрацьованих газів від механічних домішок, за котлами-утилізаторами встановлені електрофільтри.

У зв'язку з тим, що ступінь пилеунос залежить від швидкості руху газу в печі, слід прагнути до збільшення діаметра печі і зменшення коефіцієнта «її заповнення». Аналіз роботи печей різного типорозміру показав, що найбільш оптимальною є піч діаметром 3,5-4,0м і довжиною 55-65м. Саме такі печі набули найбільшого поширення за кордоном.



## 2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ ДЛЯ ПРОЖАРЮВАННЯ НАФТОВОГО КОКСУ

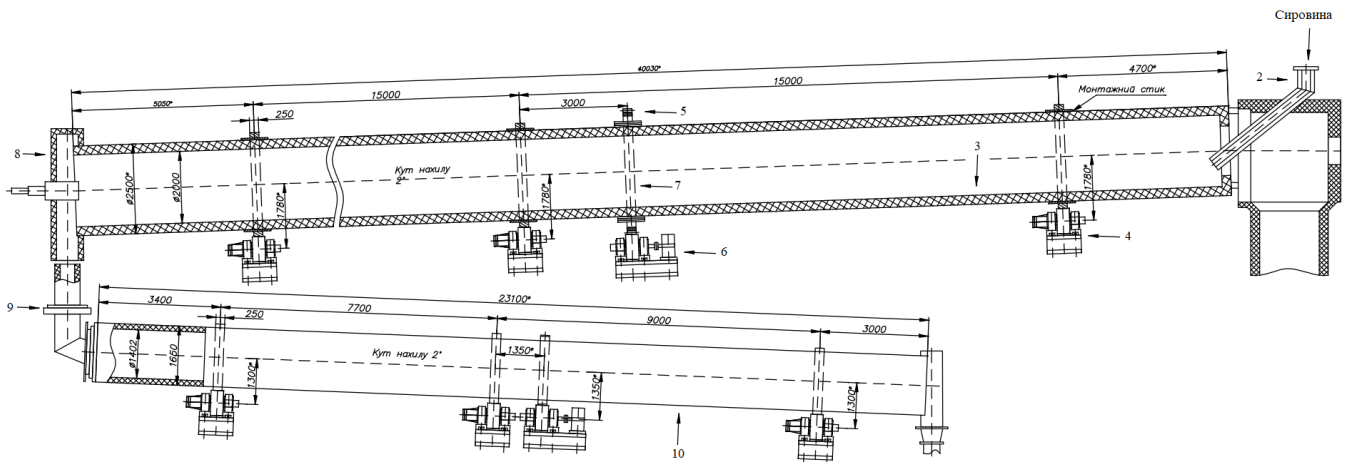
Таблиця 2.1 – Технічна характеристика обертової печі

Продуктивність, т/год	10
Площа внутрішньої поверхні печі по футеровці, м <sup>2</sup>	249,4
Питома витрата кількості теплоти, кДж/кг	2895
Відношення довжини до діаметра	20,7
Кут нахилу печі, град	2
Кількість опор	3
Частота обертання печі від головного привода, об/хв	1,65
Потужність електродвигуна головного привода, кВт	200
Потужність електродвигуна допоміжного привода, кВт	16
Діаметр опорного ролика, м	1
Діаметр бандажа, м	3,05
Діаметр цапфи осі ролика, м	0,25

### 3 ОПИС КОНСТРУКЦІЇ І ПРИНЦИП РОБОТИ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ

Коксування нафтових залишків відбувається в обертових печах.

На рисунку 3.1 зображена технологічна схема оберткової печі.



1 – пилоосаджувальна камера; 2 – живильна труба; 3 – корпус печі;  
4 – роlikоопора; 5 – зубчаста вінцева шестерня; 6 – привід; 7 – бандаж;  
8 – відкатна головка печі; 9 – пальник (форсунка); 10 – охолоджуюча труба печі

Рисунок 3.1 – Схема обертової печі

Корпус є один з найбільш відповідальних елементів обертової печі. Він піддається не тільки силовим впливам вагових навантажень, але випробує і температурні напруги, нагріваючись в зоні спікання до 300...400 °С. Стійкість футеровки у великій мірі залежить від твердості оболонки корпусу. Значні деформації корпусу приводять до різкого скорочення термінів служби футеровки. Найбільші деформації обичайок корпусу мають місце над опорами, отже, в опор твердість обичайок повинна бути більше, ніж у прольотах. Виходячи з цього обичайки корпусів розділяють на рядові (пролітні) і підбандажні, товщина яких більше, ніж пролітних.

Корпуса печей зварюються з окремих обичайок на місці монтажу в секції. Зварювання монтажних секцій виробляється після зборки і вивірки всього корпусу і нівелювання його по бандажах.

Корпус печі спирається на роликоопори бандажами. Зборка і зварювання останніх виконується на місці монтажу з півкілець, попередньо

оброблених на заводі-виробнику. При установці бандажів враховують різне теплове розширення підбандажної обичайки і бандажа. У холодному стані між бандажем і підбандажною обичайкою передбачають зазор на теплове розширення обичайки. Зазори вибираються такими, щоб забезпечувалася щільна посадка бандажа. Якщо зазор у сполученні бандаж – підбандажна обичайка не усунута, при обертанні печі має місце відносне переміщення поверхонь, що сполучаються, як наслідок, їхнє зношування. Цей зазор вибирають таким чином, щоб при розігріві корпусу печі одержати посадку з деяким тепловим натягом, що забезпечує більш надійне з'єднання бандажа з корпусом. Однак у цьому випадку при розрахунку підбандажної обичайки і бандажа варто враховувати напруги від теплового натягу. Бандажі, як правило, установлюють на попередньо приварені до підбандажної обичайки корпусу печі накладки товщиною 25...40 мм із проміжками, рівними ширині накладок.

Опори печі містить у собі фундаментну раму і дві роликоопори, кожна з яких складається з ролика з віссю і підшипниковими вузлами, встановлених у корпусах на рамі. Під роликами на рамі передбачена установка водяних ванн для охолодження роликів. Ролик встановлюється на вісь методом напресовки.

У рух піч приводиться через зубчастий вінець, посаджений на її корпус, який знаходиться в зачепленні з ведучою шестернею. Для обертання печі з такою незначною швидкістю між електродвигуном і ведучою шестернею встановлюється, зазвичай, потужний редуктор із середнім передавальним числом  $i = 180$ . Для найменшого скручування корпусу під час його обертання вінець поміщають приблизно на однаковій відстані від завантажувального і розвантажувального кінців печі. Абразивний пил та висока температура на деталі приводного механізму впливають не сильно. Через великий крутний момент, який діє на вінець, його доводиться виготовляти з великим модулем зачеплення, що дорівнює 40-50 мм.

Подальше збільшення розмірів і продуктивності знову виготовлених печей, що супроводжується зростанням потужності, потрібної для їх обертання, призвело до необхідності обладнати такі печі двома приводними

пристроями, розташованими по обидва боки зубчастого вінця. У печей великих розмірів, які мають велику інерцію, крім основного, встановлюється ще допоміжний приводний механізм, за допомогою якого піч приводиться в рух (1-4 об./год). При ремонті корпусу печі або його футеровки часто доводиться повертати піч на певний кут. Допоміжний приводний механізм використовують також для повільного обертання розігрітої печі і усунення провисання її корпусу по довжині зони найвищої температури при раптовому припиненні подачі на завод електроенергії. Щоб можна було використовувати допоміжний приводний механізм, його обладнають спеціальним електрогенератором, що приводиться в рух від бензинового двигуна або дизеля. Оскільки, швидкість обертання печі при роботі допоміжного приводного механізму дуже мала, незначна і споживана їм потужність.

Робота приводного механізму печі багато в чому залежить від правильності посадки зубчастого вінця на її корпус. Вінець повинен розташовуватися центрально щодо центру перетину корпусу, міцно з'єднуватися з ним і еластично сприймати окружне зусилля, що передається ведучою шестірнею. У більшій частині працюють обертових печей зубчасті вінці посаджені на корпус за допомогою тангенціально розташованих плоских пружин або за допомогою пружин, встановлених уздовж.

Однак, точність посадки вінця на корпус за допомогою тангенціально розташованих пружин досягається з великими труднощами. Крім того, через наявність приливів ускладнюється конструкція вінця. Зі збільшенням діаметра печі недоліки посадки вінця на корпус за допомогою тангенціально розташованих пружин значно зростають.

Загалом, приводний механізм має досить складну конструкцію та багато елементів. А як відомо чим більша кількість складових тим менша надійність всього приводу. Також, правильно встановити зубчастий вінець вимагає багато часу та зусиль. Ці недоліки є дуже вагомими і в сучасних реаліях їм не місце.

## 4 Патентно-літературний огляд та обґрунтування модернізації підводу повітря

Мета: провести патентно-літературний огляд обертової печі для модернізації та вдосконалення вузла з підводу повітря в зону прожарювання.

### 4.1 Результати патентного пошуку з модернізації вузла для підводу повітря в зону прожарювання обертової печі

Результат пошуку патентів з модернізації підводу повітря для обертової печі зведено у таблицю 4.1

Таблиця 4.1 – Результат патентного пошуку

№ з/п	Предмет пошуку	Країна видачі, вид та номер документу	Сутність технологічного рішення та ціль його створення
1	Обертова піч	UA 43613 F27B7/00 Обертова 25.08.2009, Бюл.№ 16, 2009 р. (72) Щербина Валерій Юрійович, Величко Юрій Михайлович, Сівецький Володимир Іванович, Номер заявки: u200902615 25.08.2009, Бюл.№ 16, 2009р	Обертова піч, що містить металевий корпус, футерований вогнетривкою цеглою, виконаною з виїмками на повернутому до корпусу торці, заповненими теплоізоляційним матеріалом, яка відрізняється тим, що виїмки мають трикутну форму.
2	Обертова піч	UA 77826 F27B7/00 Обертова піч Гайворонський Віктор Федорович (UA), Посторонко Анатолій Іванович (UA)Номер заявки: u 2012 10612 25.02.2013, Бюл.№ 4	Обертова піч, що містить корпус, бандажі, опорні і упорні ролики, підшипники, завантажувальні і вивантажувальні пристрої, привід обертання печі, кільця жорсткості, обмежувач кілець, яка відрізняється тим, що кільця жорсткості виконані прямокутної форми
3	Обертова піч	UA 80926 F27B7/00 Обертова піч Гайворонський Віктор Федорович (UA), Посторонко Анатолій Іванович (UA) Номер заявки: u 2013 00630 10.06.2013, Бюл.№ 11	Обертова піч, що містить корпус, бандажі, упорні ролики з підшипником, завантажувальні і вивантажувальні пристрої, привід обертання печі, яка відрізняється тим, що бандажі опираються на ряд розташованих в жолобі сталених опорних куль. 2. Обертова піч за п. 1, яка відрізняється тим, що бандажі виконані кільцеподібної форми.

4	Обертова піч	UA 27585 F27B7/00 Обертова піч Щербина Валерій Юрійович, UA, Сівецький Володимир Іванович, UA, Чжан Юлінь, Чемерис Андрій Олегович, UA, Бельдій Людмила Сергіївна, UA, Степановський Анатолій Олександрович, UАномер заявки: u200706293 12.11.2007	Обертова піч, що містить циліндричний корпус з опорно-упорними вузлами, повністю розміщений в ємності, виконаний у вигляді секцій, розташованих уздовж осі корпусу, яка відрізняється тим, що вона додатково містить пристрої контролю угину корпусу печі, які з'єднані з регулятором рівня рідини і розташовані в кожній із секцій.
5	Обертова піч	Пристрій для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі МПК(2019.01) F27B 7/36 F27B 7/22 Карвацький А.Я. C10B 49/04	Пристрій для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі, що містить закріплений на зовнішній поверхні барабана щонайменше один вентилятор, вихідний отвір корпусу якого через перехідну трубу сполучено з порожниною барабана, який відрізняється тим, що перехідну трубу виконано у вигляді об'ємної або плоскої спіралі Відрізняється тим, що перехідна труба в місці з'єднання з барабаном містить прямолінійну ділянку, розташовану в діаметральній площині барабана з нахилом у бік обертання барабана
6	Обертова піч	Сп 90051 f27b 7/28 (2006.01) обертова обпалювальна піч Хе синбхуа; ван санхуей; Лі веньхуей; дін чжицин; Нін деї; шень веймін 25.03.2010, бул.№6	Відрізняється тим, що зазначена вогнетривка цеглина виконана клиноподібною з рівнобедреним трапецієподібним поперечним перерізом. Обертова обпалювальна піч, яка відрізняється тим, що зазначений теплоізоляційний шар містить вогнетривке фіброволокно
7	Нефтяной кокс	Способ получения нефтяного кокса RU 2296151 Валявин Константин Геннадьевич (RU)	Отличающийся тем, что после пробуривания центральной скважины осуществляют резку кокса верхней части камеры до полного ее освобождения от кокса на глубину 4-5 м, затем убирают выгруженный кокс из-под камеры и производят резку нижней части камеры до полного ее освобождения, при этом кокс, выгруженный из верхней части камеры, и кокс, выгруженный из нижней камеры, складировать отдельно.
8	Нефтяной кокс	Способ сжигания нефтяного кокса F23C1/06 Шульман В.Л.	Отличающийся тем, что пылеприготовление нефтяного кокса и каменного угля осуществляют совместно или раздельно с последующим смешиванием перед входом в горелку или осуществляют раздельную их подачу.

9	Нефтяной кокс	Способ извлечения ванадия из нефтяного кокса C22B7/00 RU 2647725 Рудко Вячеслав Алексеевич (RU)	Отличающийся тем, что выщелачивание проводят в смеси концентрированных серной и азотной кислот в соотношении 1:1 при температуре от 95 до 105°C при соотношении нефтяного кокса и смеси кислот от 1:3 до 3:1 в течение от 1 до 2 часов.
---	---------------	--	---

## 4.2 Вибір модернізації вузла обертової печі з підводу повітря

Корисна модель належить до конструкцій обертових печей, зокрема до засобів для подавання атмосферного повітря в їхні барабани і може бути використана в хімічній і металургійній галузях промисловості під час перероблення твердих вуглецевмісних матеріалів, зокрема для одержання якісного кальцинованого нафтового коксу.

Відомий пристрій для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі, що містить закріплений за межами барабана щонайменше один вентилятор, вихідний отвір корпусу якого через перехідну трубу сполучено з порожниною барабана, при цьому перехідну трубу розташовано з одного з торців барабана. Недоліком зазначеного пристрою є неможливість підведення атмосферного повітря в інше місце порожнини барабана по його довжині, крім торцевої ділянки, що звужує технологічні можливості барабана та обертової печі в цілому.

Також відомий пристрій для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі, що містить закріплений на зовнішній поверхні барабана кільцевий жолоб, сполучений як з джерелом газу (у тому числі й атмосферою), так і за допомогою виконаних в стінці барабана отворів з порожниною барабана. Недоліки цього пристрою – можливість потрапляння оброблюваного матеріалу в кільцевий жолоб, а отже зниження надійності пристрою в цілому, а також істотна складність підведення газу в жолоб.

Найбільш близьким за технічною сутністю до пропонованого технічного рішення є пристрій для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі, що містить закріплений на зовнішній поверхні барабана щонайменше один вентилятор, вихідний отвір корпусу якого через перехідну трубу

сполучено з порожниною барабана, при цьому вихідну ділянку перехідної труби розташовано безпосередньо в порожнині барабана для запобігання потрапляння в зазначену трубу оброблюваного матеріалу.

Недоліком цього способу є низький термін служби вихідної ділянки перехідної труби (а отже й пристрою в цілому), що спричинено дією на неї високої температури як димових газів, так і оброблюваного матеріалу.

В основу корисної моделі покладено задачу вдосконалення пристрій для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі, у якому його нове конструктивне виконання істотно знижує вплив високотемпературних димових газів і оброблюваного матеріалу на вихідну ділянку перехідної труби, а отже підвищує надійність роботи та ремонтпридатність пристрою в цілому.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрої для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі, що містить закріплений на зовнішній поверхні барабана щонайменше один вентилятор, вихідний отвір корпусу якого через перехідну трубу сполучено з порожниною барабана, згідно з пропонованою корисною моделлю новим є те, що перехідну трубу виконано у вигляді об'ємної або плоскої спіралі.

У найприйнятніших прикладах виконання пристрою перехідна труба в місці з'єднання з барабаном містить прямолінійну ділянку, розташовану в діаметральній площині барабана з нахилом у бік обертання барабана.

Виконання перехідної труби у вигляді об'ємної або плоскої спіралі, як засвідчують результати математичного моделювання та натурні експерименти, мінімізують ймовірність потрапляння оброблюваного матеріалу та високотемпературних димових газів у вентилятор для подавання в порожнину барабана атмосферного повітря, що істотно підвищує надійність печі в цілому. Спорядження перехідної труби в місці її з'єднання з барабаном прямолінійною ділянкою, розташованою в діаметральній площині барабана з нахилом у бік обертання барабана, ще більше знижує ймовірність потрапляння оброблюваного матеріалу та димових газів у вентилятор.

Сутність корисної моделі пояснюється кресленнями, на яких зображено:

– на рисунку 4.1 – поперечний переріз барабана в місці розташування



пристрою для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі;

– на рисунку 4.2 – результати математичного моделювання послідовного руху оброблюваного матеріалу в барабані обертової печі під час його обертання.

Пристрій для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі містить закріплений на зовнішній поверхні барабана 1 щонайменше один вентилятор 2, вихідний отвір корпусу 3 якого через перехідну трубу 4 сполучено з порожниною барабана 1, при цьому перехідну трубу 4 виконано у вигляді об’ємної або плоскої спіралі (рисунок 4.1). Перехідна труба 4 у місці з’єднання з барабаном 1 може містити прямолінійну ділянку 5, що розташована в діаметральній площині барабана 2 з нахилом у бік його обертання та ускладнює потрапляння оброблюваного матеріалу 6 у порожнину барабана 1 (рисунок 4).

Пропонований пристрій працює в такий спосіб.

Під час обертання барабана атмосферне повітря всмоктується вентилятором 2, після чого крізь вихідний отвір корпусу 3 вентилятора 2 надходить у перехідну трубу 4 і далі – безпосередньо в порожнину барабана 1.

Виконання перехідної труби 4 у вигляді об’ємної або плоскої спіралі мінімізують ймовірність потрапляння оброблюваного матеріалу 5 та високотемпературних димових газів у вентилятор 2, що істотно підвищує надійність обертової печі. Спорядження перехідної труби 4 у місці її з’єднання з барабаном 1 прямолінійною ділянкою 5 ще більше знижує ймовірність потрапляння оброблюваного матеріалу 5 і димових газів у вентилятор 1.

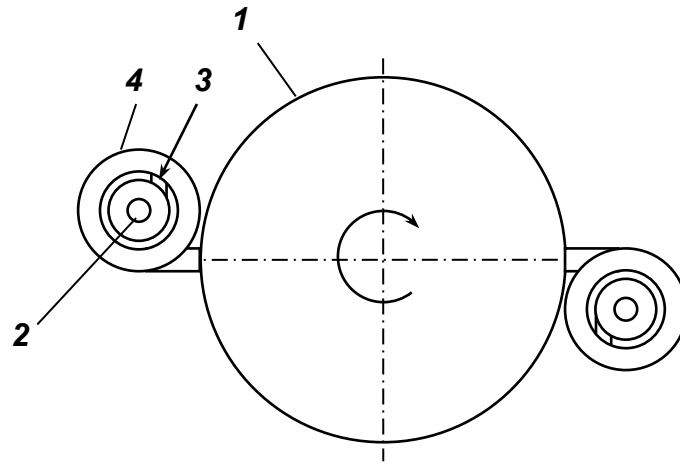
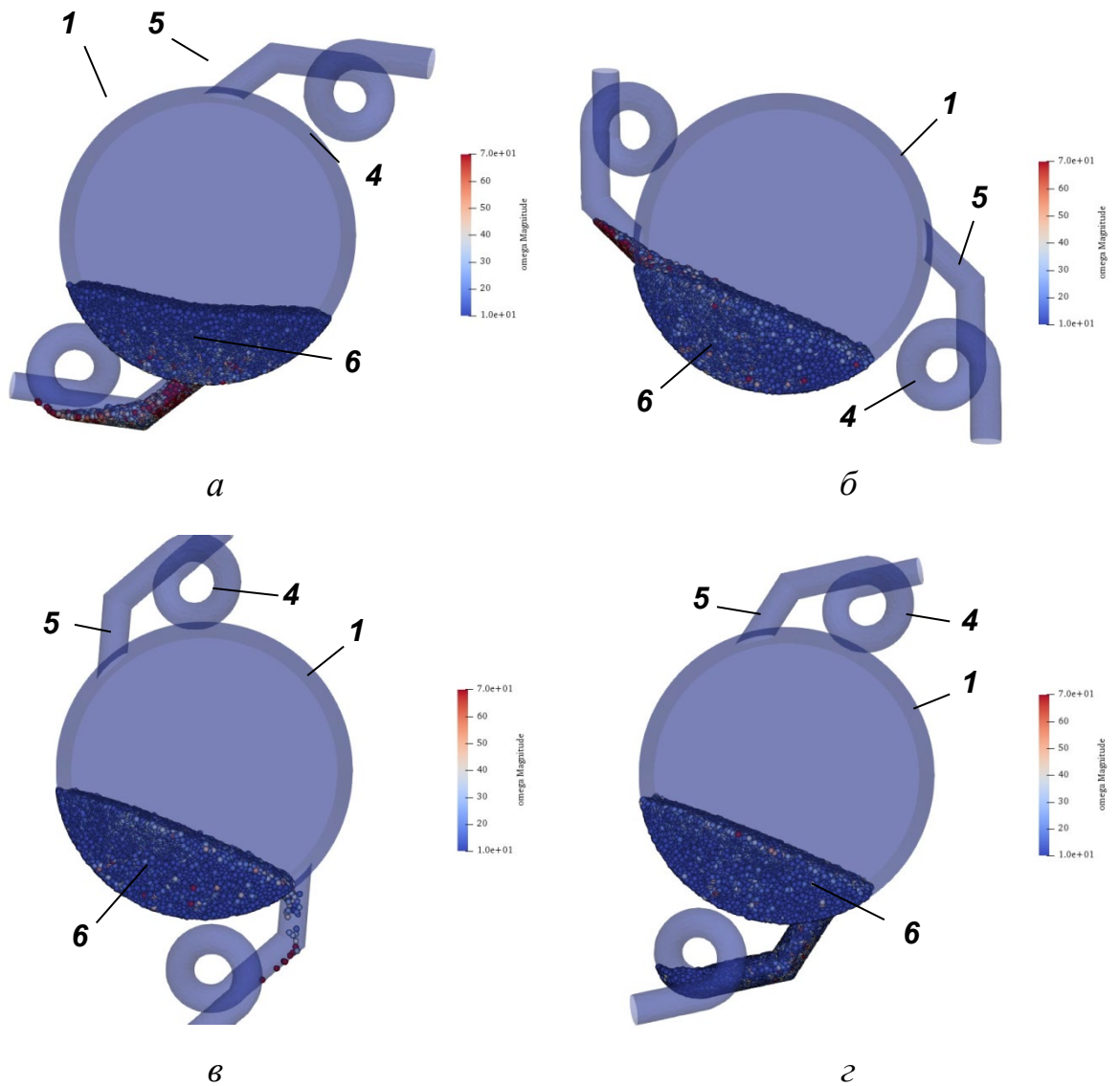


Рисунок 4.1 – Пристрій для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі



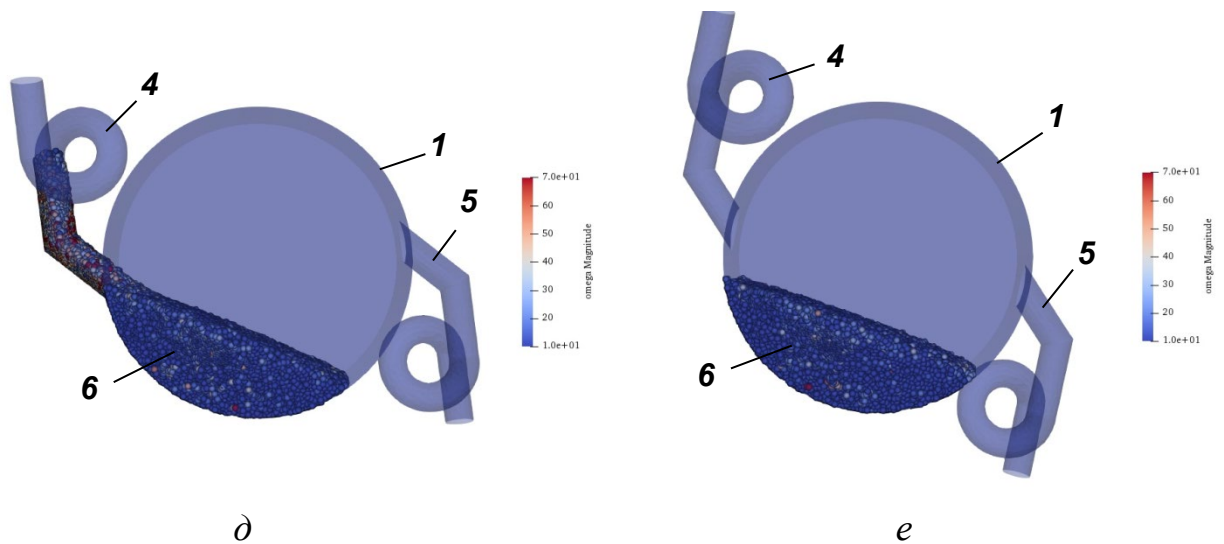


Рисунок 4.2 – Результати математичного моделювання послідовного руху оброблюваного матеріалу в барабані обертової печі під час його обертання

#### 4.3 Обґрунтування обраної модернізації вузла обертової печі з підводу повітря

Корисна модель належить до конструкцій обертових печей, зокрема до засобів для подавання атмосферного повітря в їхні барабани і може бути використана в хімічній і металургійній галузях промисловості під час перероблення твердих вуглецевмісних матеріалів, зокрема для одержання якісного кальцинованого нафтового коксу.

Пропонований пристрій містить закріплений на зовнішній поверхні барабана щонайменше один вентилятор, вихідний отвір корпусу якого через перехідну трубу сполучено з порожниною барабана, при цьому перехідну трубу виконано у вигляді об'ємної або плоскої спіралі. У найприйнятнішому прикладі виконання пристрою перехідна труба в місці з'єднання з барабаном містить прямолінійну ділянку, розташовану в діаметральній площині барабана з нахилом у бік обертання барабана.

Забезпечується зниження впливу високотемпературних димових газів і оброблюваного матеріалу на вихідну ділянку перехідної труби, а отже підвищує надійність роботи та ремонтопридатність пристрою в цілому.

## 5 ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ ДЛЯ ПРОЖАРЮВАННЯ НАФТОВОГО КОКСУ

### 5.1 Розрахунки теплової потужності обертової печі за різної продуктивності

За даними ПрАТ «Укрграфіт» маємо, що за продуктивності печі  $P_1 = 7300$  кг/год об'ємна витрата природного газу, який спалюється для підтримки потрібного теплового режиму печі, складає  $G_1^{gas} = 192$  м<sup>3</sup>/год. При цьому також відбувається вигар частини нафтового коксу з масовою витратою  $G_1^{koke} = 768,7$  кг/год, що становить біля 10,5 % від продуктивності печі. Сумарна тепла потужність обертової печі складається з теплоти від згоряння природного газу та вигару нафтового коксу, що термооброблюється. Об'ємна теплота згоряння природного газу становить  $Q^{gas} = 33,5$  МДж/м<sup>3</sup> [24], а масова теплотворна здатність нафтового коксу –  $Q^{koke} = 29,29$  МДж/кг [24]. Тоді сумарна тепла потужність обертової печі буде становити

$$Q_1 = Q^{gas} G_1^{gas} + Q^{koke} G_1^{koke} = 33,5 \cdot 10^6 \cdot 192 + 29,29 \cdot 10^6 \cdot 768,7 = 28,95 \text{ ГДж/год.}$$

Визначимо потужність обертової печі за її продуктивності  $P_2 = 10000$  кг/год за формулою

$$Q_2 = Q_1 \frac{P_2}{P_1} = 28,95 \frac{10000}{7300} = 39,66 \text{ ГДж/год.}$$

Визначимо вигар нафтового коксу у разі тільки його використання на підтримку температурного режиму процесу прожарювання матеріалу (тобто без спалювання природного газу)

$$G_2^{koke} = \frac{Q_2}{Q^{koke}} = \frac{39,66 \cdot 10^9}{29,29 \cdot 10^6} = 1354 \text{ кг/год,}$$

що складає біля 13,5 % від підвищеної продуктивності обертової печі  $P_2$ .

## 5.2 Визначення технологічних параметрів обертової печі з вузлом для подачі повітря в зону прожарювання базової конструкції

Для модернізації підводу повітря в зону прожарювання обертової печі використаємо дві схеми [13], що наведено на рисунках 5.1, 5.2.

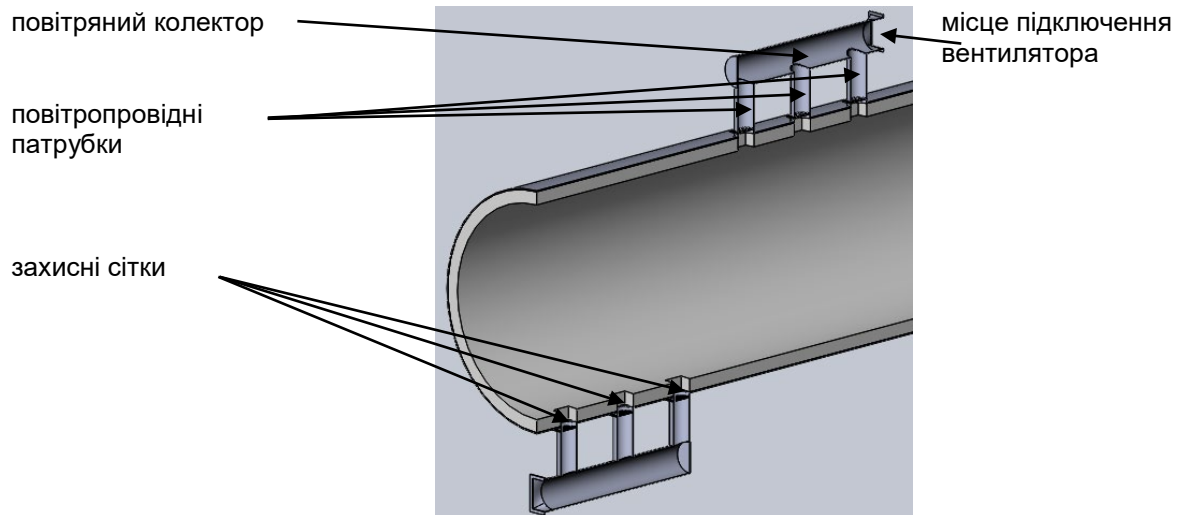


Рисунок 5.1 – Схема з повздовжньою подачею повітря без внутрішніх жарових труб з установкою захисних сіток для часткового обмеження потрапляння матеріалу в повітропроводні патрубки

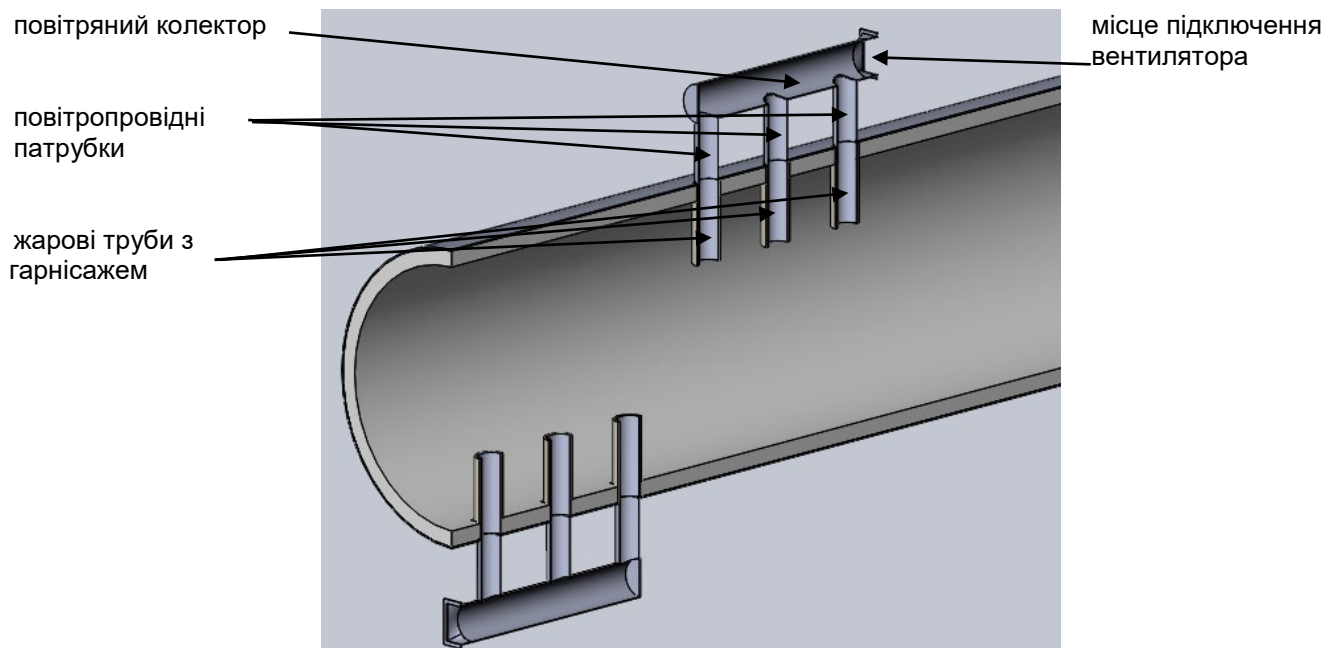


Рисунок. 5.2 – Схема з повздовжньою подачею повітря з внутрішніми жаровими трубами, захищеними керамікою (гарнісажем)

Для проведення оцінки працездатності схем подачі повітря необхідно задати основні технологічні параметри та виконати розрахунки параметрів, яких бракує. До основних технологічних параметрів відносять наступні:

- продуктивність печі –  $G = 10000$  кг/ч;
- висота слою прожарювального матеріалу  $h_m = 0,395$  м;
- висота сопел (жарових труб) для подачі додаткового повітря в зону прожарювання печі, відрахована від шару футеровки –  $h_c = 0,445$  м;
- об'ємна витрата повітря, яка необхідна для забезпечення заданої продуктивності тільки за рахунок згорання вуглецю матеріалу –  $V_{air}^a = 14187,3$  м<sup>3</sup>/ч;
- об'ємна витрата відхідних газів при умові, що процес прожарювання відбувається виключно тільки за рахунок спалювання оброблюваного матеріалу при продуктивності печі 10 т/ч і з урахуванням подачі водяної пари з витратою  $G_{H_2O} = 400$  кг/ч в гарячу головку печі на генерацію синтез газу –  $V_{yx.g}^{10+H_2O} = 25931,98$  м<sup>3</sup>/ч;
- тип обраних вентиляторів для забезпечення розрахованого витрату повітря  $V_{air}^a$  – ВЦ 14-46 №4 [25] в кількості 2 шт. з витратою по  $V_{vent.} = 8000$  м<sup>3</sup>/ч.

З наведених технологічних параметрів обертової печі тільки висота сопел потребує уточнення. Всі інші приймаються без змін, оскільки запропоновані схеми підводу повітря в зону прожарювання печі (рисунок 5.1, 5.2) не впливають на них.

Уточнення і розрахунку вимагають наступні параметри модернізованої печі:

- висота сопел (жарових труб) для подачі повітря в зону прожарювання печі;
- перетин (діаметр) сопел (жарових труб) для подачі повітря в зону прожарювання печі;
- температура і швидкість руху повітря в жарових трубах;

– швидкість і температура газового потоку в робочому просторі печі в зоні подачі повітря.

Для розрахунку внутрішнього діаметру жарових труб і повітропровідних патрубків (див. рисунок 5.2) скористаємось еквівалентністю площ відповідних перетинів. Наприклад, рівністю між вихідним перетином вентилятора  $F_в$  і потрібним перетином жарової труби  $F_{ж.тр.}$

$$F_в = 3F_{ж.тр.} \text{ або } F_в = 3\pi \frac{d_{ж.тр.}^2}{4}, \quad (5.1)$$

де  $d_{ж.тр.}$  – внутрішній діаметр жарової труби.

Вихідний перетин підбраного вентилятора ВЦ 14-46 №4 має квадратну форму з розмірами 280×280 мм. Тоді з (5.1) можна визначити  $d_{ж.тр.} = 182$  мм. Приймаємо внутрішній діаметр жарової труби рівним  $d_{ж.тр.} = 190$  мм.

З урахуванням розрахованої висоти жарових труб, що дорівнює 435, і товщини футеровки печі остаточно приймаємо їх висоту рівній  $h_{ж.тр.} = 600$  мм.

Температуру повітря на вході в жарові труби приймаємо рівною 20 °С. Швидкість руху повітря в жарових трубах  $v_{ж.тр.}$  можна розрахувати з наступної формули

$$v_{ж.тр.} f_{ж.тр.} = \frac{V_{вент.}}{3 \cdot 3600}, \quad (5.2)$$

де  $f_{ж.тр.} = \pi \frac{d_{ж.тр.}^2}{4}$  – площа перетину жарової труби, м<sup>2</sup>. Тут множник 3 відповідає кількості жарових труб на один вентилятор. При  $V_{вент.} = 8000$  м<sup>3</sup>/год і  $f_{ж.тр.} = 0,028$  м<sup>2</sup> відповідно з (5.2) отримуємо, що  $v_{ж.тр.} = 26$  м/с.

Параметри руху повітря в жарових трубах і газового потоку в робочому просторі печі в зоні подачі холодного повітря необхідні для оцінки температурних умов експлуатації внутрішніх сопел для подачі повітря і вибору матеріалу для їх виготовлення.

### 5.3 Визначення температурних умов діючої обертової печі з подачею вторинного повітря в зону прожарювання за даними кампанії Rain СП

Фото робочого простору обертової печі з подачею повітря в зону прожарювання разом з легендою колірних температур показана на рисунку 5.3.



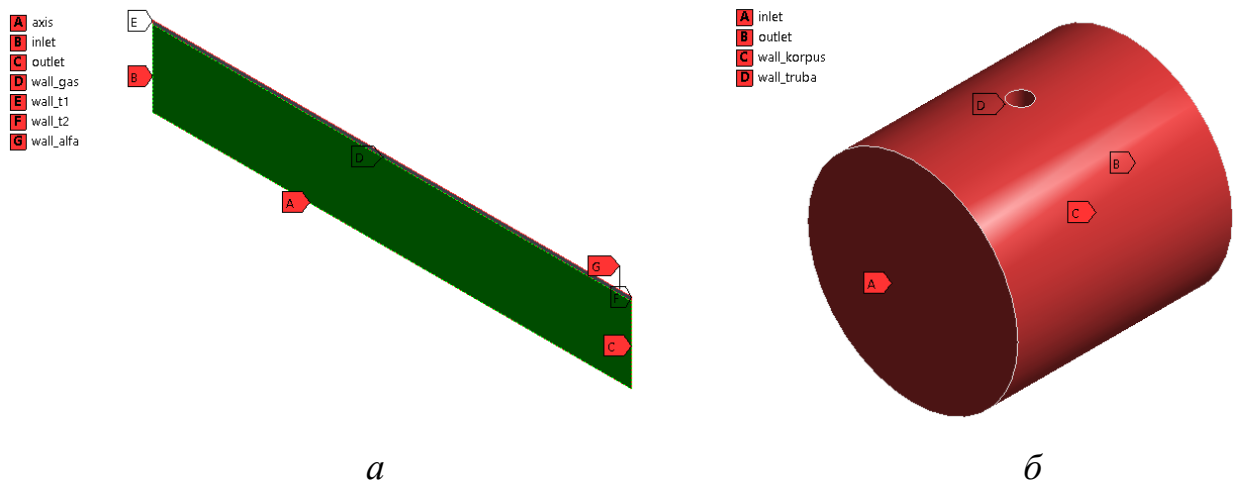
Рисунок 5.3 – Фото робочого простору обертової печі з подачею повітря в зону прожарювання (а) разом із легендою колірних температур (б) за даними кампанії Rain СП [\[13\]](#)

На рисунку 5.3 чітко видно, що установка жарових труб призводить до локального зниження рівня температур самих труб, футеровки та навіть шару прожарюваного матеріалу. Це пов'язано з рухом холодної маси повітря, що виходить з жарових труб. На поверхнях жарових трубах у процесі експлуатації печі мабуть знаходиться шар гарнісажу (можливо золи), а не шар вогнетривку, накладеного в період монтажу футеровки. З аналізу рисунка 5.3 можна зробити такі висновки з оцінки температурних умов в робочому просторі обертової печі з жаровими трубами для подачі вторинного повітря через бічні її стінки: рівень температур у зонах установки труб приблизно становить – безпосередньо на поверхнях труб – 580–730 °С, на поверхні футеровки обичайки – 730–800 °С і на поверхні матеріалу – 730–900 °С; рівень температур у зоні прожарювання – 900–1300 °С.



## 5.4 Числовий аналіз температурних умов роботи сталевих жарових труб в процесі експлуатації обертової печі базової конструкції

Для оцінки температурних умов роботи сталеві основи жарових труб і захисної сітки в обертовій печі за схемами (див. рисунки 5.1, 5.2) з метою підбору необхідної марки сталі потрібно виконати серію відповідних тепло-гідродинамічних розрахунків. Для виконання зазначених розрахунків було запропоновано використовувати дві тепло-гідродинамічні моделі замість значно складнішої однієї. Перша з моделей відноситься до каналу холодного повітря, утвореного внутрішнім простором жарової труби (рисунок 5.4а) і є вісесиметричною двовимірною, друга являє собою частину робочого простору печі з пронизуючою його наскрізь жаровою трубою (рисунок 5.4б) і є тривимірною, в якій також поряд з конвективним теплообміном враховується радіаційний теплообмін.



*a* – канал, утворений внутрішнім простором жарової труби; *б* – частина робочого простору печі з пронизуючою його наскрізь жаровою трубою

Рисунок 5.4 – Тепло-гідродинамічні моделі елементів обертової печі

Визначимо спочатку температуру газового потоку  $t_n$  і швидкість його руху  $v_n$  для другої моделі. Прийmemo, що температура газового потоку

змінюється в діапазоні  $t_n = 800\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Швидкість руху газів в зоні установки жарових труб можна розрахувати з формули аналогічної (5.2)

$$v_n f_n = \frac{V_n}{3600}, \quad (5.3)$$

де  $f_n = \pi \frac{D_g^2}{4} = 3,017\text{ м}^2$  – площа перетину робочого простору печі;  $V_n = V_{\text{ух.г}}^{10+\text{H}_2\text{O}} = 25931,98\text{ м}^3/\text{ч}$  – об’ємна витрата відхідних газів печі.

У результаті з (5.3) отримуємо, що  $v_n = 2,4\text{ м/с}$ .

Розглянемо граничні умови для двовимірної вісесиметричної моделі (рисунок 5.4а):

- на вході inlet – задані температура і швидкість потоку повітря  $t_{\text{ж.тр.}} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v_{\text{ж.тр.}} = 26\text{ м/с}$ ;

- на виході outlet – задані нульовий тиск і температура димових газів в печі поблизу жарової труби, яка визначається з рішення другої моделі;

- на торці труби, яка знаходиться в контакті з металевим барабаном печі wall\_t1 – задана температура стінки  $50\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$ ;

- на зовнішній поверхні труби (гарнісажу) і другому її торці wall\_alfa, wall\_t1 – задані умови конвективного типу – коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні труби і температура газів у печі поблизу жарової труби, яка визначається з розв’язку другої моделі.

Розглянемо граничні умови для тривимірної моделі (рисунок 5.4б):

- на вході inlet – задані середня температура по перетину і швидкість потоку димових газів  $t_n = 900\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v_n = 2,4\text{ м/с}$ ;

- на виході outlet – задані нульовий тиск і температура газів;

- на поверхні обичайки печі wall\_korpus – задані граничні умови конвективного типу з навколишнім середовищем;

- на поверхні жарової труби (гарнісажу) задана середня температура потоку і коефіцієнт тепловіддачі, який визначається з розв’язку першої задачі.

Властивості газів і матеріалів, використаних під час розв’язання зазначених задач:

– повітря – щільність, масова ізобарна теплоємність і коефіцієнт теплопровідності за температури 20 °С;

– димові гази – щільність, масова ізобарна теплоємність і коефіцієнт теплопровідності за температури 900 °С;

– коефіцієнт теплопровідності сталі – 40 Вт/(м·К);

– коефіцієнт теплопровідності вогнетриву, гарнісажу – 2–5 Вт/(м·К).

Сформульована задача розв’язується методом послідовних наближень між рішеннями дух завдань. Критерієм отримання розв’язку при цьому є середня температура сталевій основи жарової труби, знайдена з наперед заданою точністю.

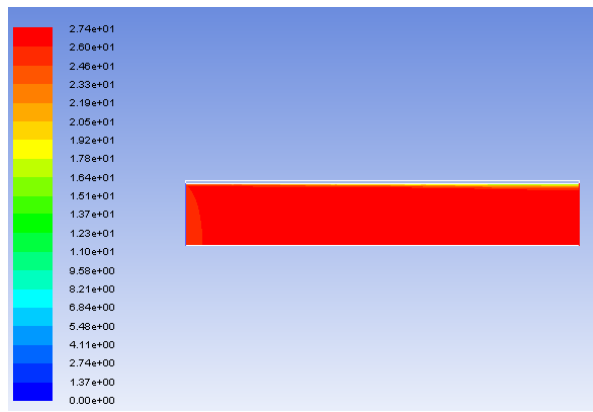
Розрахунки проводилися як за відсутності вогнетриву (гарнісажу) на поверхні жарової труби, так і з їх наявністю. Результати розрахунків наведено на рисунках 5.5, 5.6. Похибка визначення середньої температури стінки труби склала 0,8–1,42%.

Аналіз розрахунків показує, що:

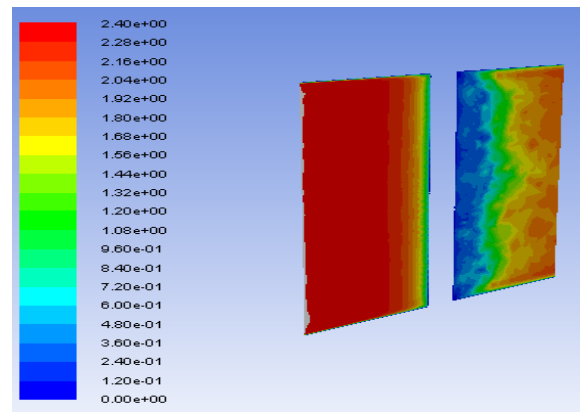
– наявність вогнетриву (гарнісажу) на поверхні жарової труби товщиною не менше 20 мм знижує її максимальну температуру на 150–160 °С порівняно з варіантом незахищеної труби, що знижує вимоги до вибору марки жароміцної сталі;

– за відсутності вогнетриву (гарнісажу) на поверхні жарової труби її максимальна температура досягає значень 585 °С. Відповідно до цієї температури і даних таблиці 5.1 необхідною маркою сталі є сталь з температурою тривалого застосування 600 °С, наприклад 12Х18Н10Т;

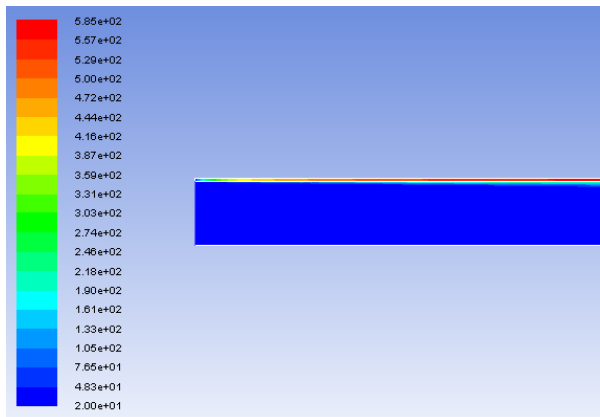
– за наявності вогнетриву (гарнісажу) на поверхні жарової труби товщиною не менше 20 мм її максимальна температура досягає значень 434 °С. Відповідно до цієї температури і даних таблиці 5.1 необхідною маркою сталі є сталь з температурою тривалого застосування 500 °С, наприклад, 20Х13.



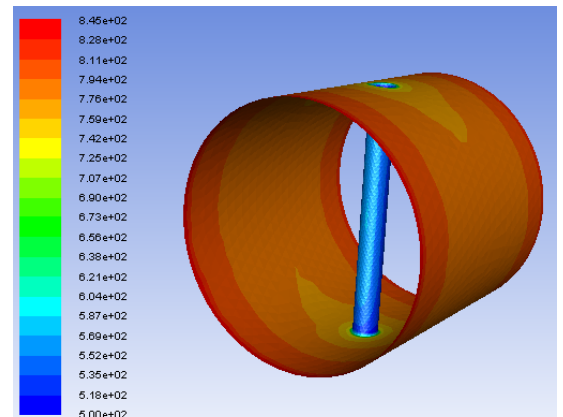
*a*



*в*



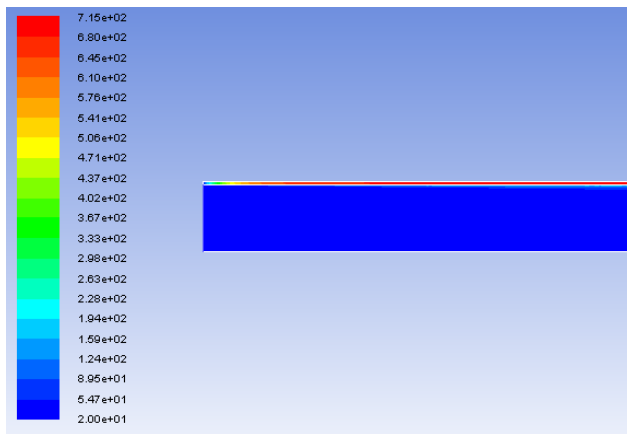
*б*



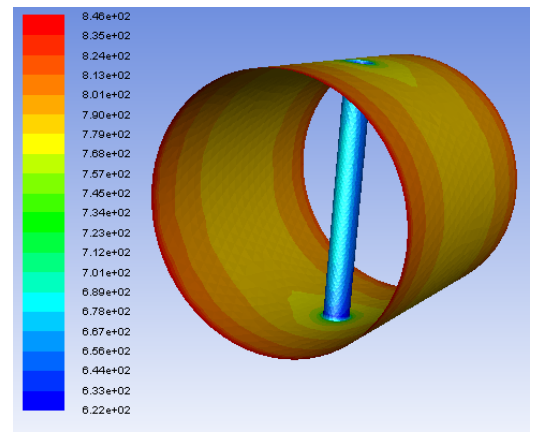
*г*

*a, б* – двовимірний модель; *в, г* – тривимірний модель; *a, в* – поле результуючої швидкості потоку; *б, г* – поле температур; (*б* – 492 °C; *г* – 485 °C) – середня температура стінки сталевих труб; (*б* – 585 °C; *г* – 573 °C) – максимальна температура стінки сталевих труб

Рисунок 5.5 – Результати розрахунків тепло-гидродинамічного стану обертової печі з установкою жарових труб для подачі повітря в зону прожарювання (варіант за відсутності вогнетрива (гарнісажу) на поверхні труби)



*a*



*б*

*a* – двовимірна модель; *б* – тривимірна модель; *a, б* – поле температур; (*a* – 363 °С; *б* – 366 °С) – середня температура стінки сталеві труби;

(*a* – 434 °С; *б* – 407 °С) – максимальна температура стінки сталеві труби

Рисунок 5.6 – Результати розрахунків тепло-гідродинамічного стану обертової печі з установкою жарових труб для подачі повітря в зону прожарювання (варіант за наявності вогнетрива (гарнісажу) на поверхні труби товщиною 20 мм)

Таблиця 5.1 – Температура застосування при надтривалій експлуатації (до 100 тис. год)

Марка сталі або сплаву	Максимальна температура застосування, °С	Температура початку інтенсивного окало утворення на повітрі, °С
09X16H15M3Б (ЕІ847)	350	850
12X13	550	750
12X18H10Т	600	850
12X18H12Т	600	850
12X18H9Т	600	850
18X12ВМБФР (ЕІ993)	500	750
20X12ВНМФ (ЕП428)	600	750
20X13	500	750
31X19H9МВБТ (ЕІ572)	600	800
55X20Г9АН4 (ЕП303)	600	750

Вищеописані розрахунки були проведені для випадків, коли внутрішні жарові труби контактують виключно з газовим середовищем. Однак, на практиці, за рахунок обертання печі жарові труби будуть по черзі вступати в контакт як з газовим середовищем печі, так і з сипучим прожарюваним

матеріалом, що в свою чергу буде впливати на зміну інтенсивності теплообміну між трубами і середовищем контакту. Для оцінки цього впливу обмежитися тільки розв'язками задач стаціонарної теплопровідності не є можливим. Тому необхідно перейти до розв'язку нестационарної задачі теплопровідності, в якій можна врахувати поперемінні зміни контактуючих з жаровими трубами середовищ у часі.

Для вирішення такого завдання була розроблена відповідна числова модель нестационарної теплопровідності для четвертої частини жарової труби і визначені параметри зміни граничних умов конвекційного типу в часі.

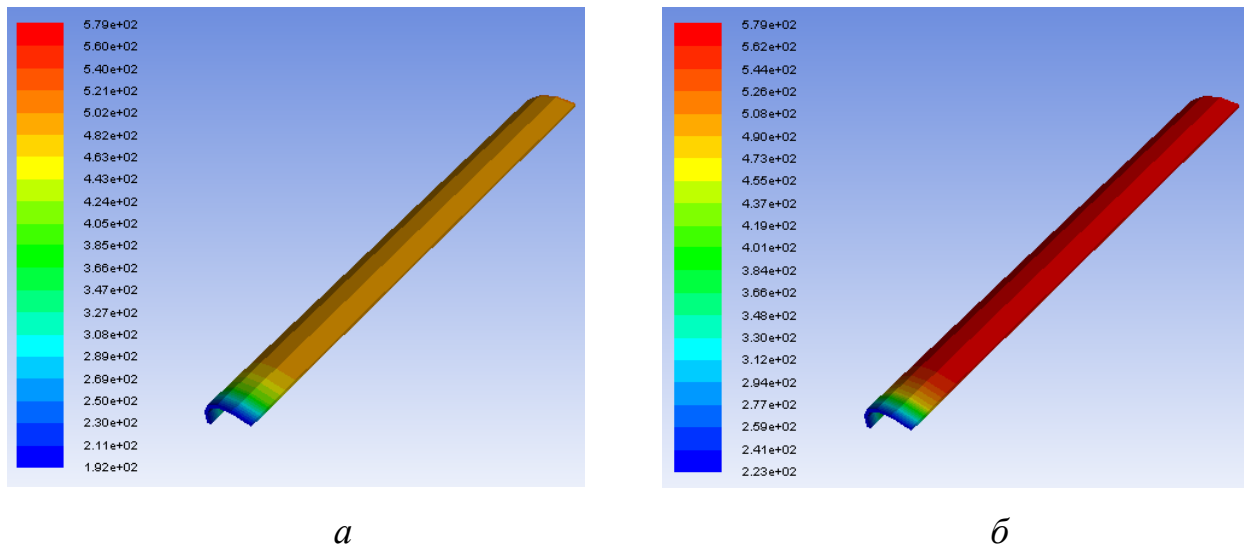
Для визначення тривалості контакту жарових труб з газовим та сипучим середовищем за рахунок обертання печі були використані такі вихідні дані:

- частота обертання печі –  $n = 1,65$  об./хв;
- кут сегмента перетину печі, заповненого прожарюваним матеріалом  $\alpha = 106.8^\circ$ .

Виходячи з наведених даних були визначені такі величини, необхідні для проведення розрахунків: період одного оберту барабана печі –  $\sim 37$  с, тривалість контакту з газовим середовищем  $\sim 26$  с і відповідно тривалість контакту з сипучим матеріалом  $\sim 11$  с.

Також було прийнято, що під час контакту жарової труби з сипучим середовищем коефіцієнт тепловіддачі ( $\alpha$ ) збільшується в 5 разів у порівнянні з  $\alpha$  у разі контакту з газовим середовищем, знайдений із розв'язку тепло-гідродинамічних задач, наведених раніше.

Результати розрахунків наведені на рисунках 5.7, 5.8.



*а* – контакт з газовим середовищем; *б* – контакт з прожарюваним матеріалом

Рисунок 5.7 – Зміна температурного поля жарової труби без гарнісажу при зміні її контакту з газовим середовищем на прожарюваний матеріал за рахунок обертання барабана печі

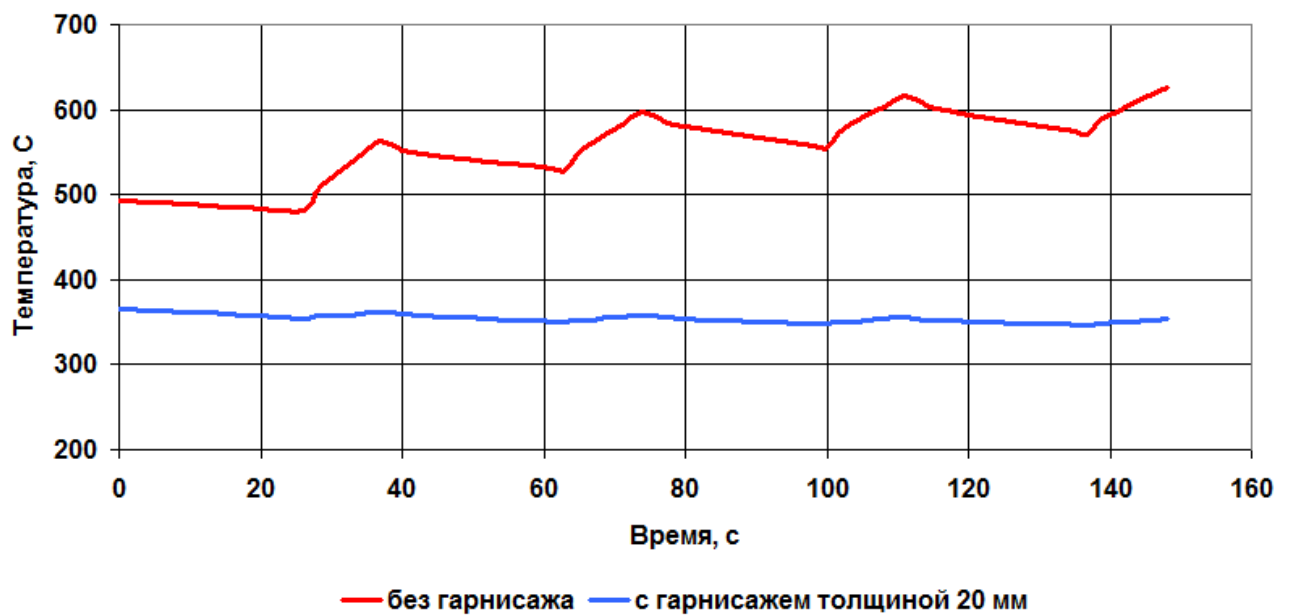


Рисунок 5.8 – Зміна середньої температури стінки жарової труби без і за наявності гарнісажу в часі за результатами розв’язку нестационарної задачі з урахуванням зміни типу контакту труби з газового середовища на прожарюваний матеріал

Аналіз результатів розрахунків показує, що:

- за наявності захисного шару гарнісажу на жаровій трубі рівень її середньої температури практично не залежить від зміни її контакту з газового середовища на прожарюваний матеріал (рисунок 5.8, синя лінія). У той час як за відсутності гарнісажу цей вплив може перевищувати 100 °С;
- проведені розрахунки підтвердили раніше зроблений висновок про те, що за наявності захисного шару вогнетриву на жарових трубах товщиною не менше 20 мм в якості матеріалу для їх виготовлення можна використовувати сталь 20Х13.



## 6 МОНТАЖ І ЕКСПЛУАТАЦІЯ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ

У процесі експлуатації печі виникають несправності в топковій камері і газоходах, пекарній камері, конвеєрі і його приводі, і допоміжних пристроїв. Для усунення несправностей піч зупиняють на поточний або капітальний ремонт.

Перед ремонтом піч зупиняють і охолоджують протягом 2-3 діб, для чого після зупинки відкривають топкові дверцята і прочищені люки газоходів. У деяких випадках (особливо при аваріях) для прискорення охолодження печі застосовують переносні вентилятори. При ремонті топкової камери замінюють зношену футеровку і перекладають склепіння і стіни топкового фронту.

Приступаючи до розбирання кладки, спочатку знімають навісну гарнітуру, топкові дверцята і раму, а потім починають розбирання кладки. Розбирання виконують так, щоб була забезпечена збереженість не ремонтних частин кладки і виключена можливість обвалів і випадання окремих цеглин. Кладку розбирають з обов'язковим збереженням старої придатної цегли.

Після розчищення розібраної кладки приступають до кладки пошкоджених ділянок. Виклавши внутрішні стінки камери, роблять склепіння і відновлюють зовнішню стінку. Потім встановлюють топкову раму і навішують топкову і піддувні дверцята. При необхідності встановлюють нові топкові рами та двері.

Ремонт газоходів зводиться до усунення завалів, причиною яких зазвичай бувають вигорання цеглин. Для ліквідації завалу вибирають кладку в найближчих до газоходу ділянках і через отвори, що утворилися, видаляють вивалену цеглу, шматки сухого розчину і сажі. Після очищення газоходу закладають пошкоджені місця і закривають розкриті місця у кладці. У печах з димогарними трубами очищають димогарні коробки і труби, перевіряють ущільнення у стиках і при необхідності димогарні труби замінюють новими.

При ремонті камери в першу чергу знімають з конвеєра люльки, а при необхідності витягають і конвеєрні ланцюги. Потім очищають від накипу, масла і бруду напрямні, після чого напрямні, які підтримують, їхні кронштейни

і болтові з'єднання, ретельно оглядають. При виявленні на напрямних вибоїн чи уступів їх усувають шляхом розміщення підкладок під напрямні.

Ремонт ланцюгів конвеєрів зводиться до заміни непридатних сполучних пальців, втулок, роликів і щічок. У люльок перевіряють штирі, шплінти, кронштейни, поперечні планки і місця зварювання. Погнуті люльки піддають правці з наступною перевіркою на кондукторі. Паралельно з ремонтом конвеєра перевіряють регулятор швидкості, редуктор, приводну і натяжну станції. При цьому залежно від виду ремонту розбирають, промивають і вимірюють тертьові частини, знімають вали, перевіряють їх у центрах на токарних верстатах і зачищають шийки. При капітальному ремонті замінюють регулятор швидкості і редуктор.

Ремонт допоміжних пристроїв печі зводиться до заміни зношених тросів, блоків і перегорілих шибєрів. Одночасно проводять очищення та перевірку труб, що підводять до топки повітря і вологу, при необхідності повністю замінюють зношені повітроводи і трубопроводи.

Ремонт тепло-утилізаційних установок полягає у зовнішньому і внутрішньому очищенні поверхонь нагріву, перевірці вентилів, кранів і патрубків.

Після ремонту необхідна просушка печі. Розігрів з холодного стану до робочої температури проводиться обережно, збільшуючи температуру поступово. На повний розігрів печі потрібно 14 - 16 годин. Відремонтована піч повинна відповідати технічним умовам, встановленим для монтажу нових печей. При ремонті печей повинні суворо дотримуватися всі встановлені правила техніки безпеки.

Основними компонентами обертової печі є обичайка, вогнетривка футеровка, підтримувальні бандажі та ролики, тяговий триб та внутрішні теплообмінники.

Обичайка виготовляється з прокатних листів низьковуглецевої сталі, товщиною зазвичай між 15 та 30 мм, звареної у формі циліндра, який може бути довжиною до 230 мм та діаметром до 6 метрів. Вона зазвичай розміщується по осі схід/захід для запобігання вихрових струмів.

Верхні обмеження діаметра спричинені схильністю обичайки до деформації в овальний поперечний переріз, що призводить до викривлення під час обертання. Довжину обмежувати не обов'язково, але, якщо піч дуже довга, стає важко впоратись зі зміною довжини під час нагрівання та охолодження (зазвичай близько 0,1 до 0,5% від довжини).

Призначення вогнетривкої футеровки полягає в убереганні сталевій обичайки від високих температур всередині печі, та захисту її від корозійних властивостей матеріалу що обробляється. Футеровка може складатися з вогнетривкої цегли або вогнетривкого бетону, або може бути відсутня в зонах печі, де температура не перевищує 250 °C. Вогнетрив вибирається в залежності від температури в печі та хімічної природи матеріалу що обробляється. В деяких сферах виробництва, таких як виробництво цементу, термін експлуатації футеровки збільшується, завдяки утворенню на поверхні футеровки шару матеріалу з виробничого процесу. Товща футеровки зазвичай становить 80 — 300 мм. Типовий вогнетрив може витримувати коливання температури в 1000 °C між його гарячим та холодним станом. Температура обичайки не повинна перевищувати 350 °C для запобігання пошкодженню сталі, цілодобово працюючі інфрачервоні сканери використовуються для раннього сповіщення про «гарячі точки», які вказують на проблеми з футеровкою.

Бандажі зазвичай складаються з єдиної кільцеподібної відливки, обробленої до стану гладкої циліндричної поверхні, яка вільно прикріплюється до обичайки печі за допомогою низки спеціальних кріплень. Це потребує дещо оригінального дизайну, бо бандаж повинен щільно прилягати до обичайки, але також не заважати тепловому рухові. Бандаж обертається на парі сталевих роликів, також оброблених до стану гладкої поверхні циліндру, та розташованих на половині діаметра печі кожний. Ролики повинні підтримувати піч та забезпечувати обертання з найменшим тертям, на скільки це можливо. Добре зроблена піч, при відключенні живлення, буде колихатись на зразок маятника декілька раз, до повної зупинки. Маса типової печі розмірами 6×60 м, з врахуванням вогнетриву та завантаженого матеріалу, становить близько 1100

тон, та повинна підтримуватись трьома бандажами та групами роликів, розставлених по довжині печі. Найдовші печі можуть мати 8 груп роликів, в той час як дуже короткі печі можуть мати тільки дві. Печі зазвичай проходять 0,5...2 об/хв, але іноді і 5 об/хв. Печі на найсучасніших заводах з виробництва цементу роблять 4...5 об/хв. Підшипники роликів повинні витримувати великі тривалі робочі навантаження, та повинні бути ретельно захищені від тепла печі та попадання пилу. Крім опорних роликів є, зазвичай, верхні та нижні «упорні (протидіючі) ролики» які опираються у бік бандажу, це запобігає сковзанню печі з опорних роликів.

Піч зазвичай обертається за допомогою одного зубчастого вінця, який оперізує найхолоднішу частину печі, але іноді рухається за допомогою приводних валиків. Вінець з'єднаний зубчатою передачею з електромотором з регульованою швидкістю. У нього повинен бути великий пусковий обертальний момент для запуску печі з великою ексцентричним завантаженням. Для обертання печі 6 x 60 метрів зі швидкістю 3 об/хв, необхідно близько 800 кВт. Швидкість проходження матеріалу через піч пропорційна до швидкості обертання, і для контролю цього потрібен мотор з регульованою швидкістю. У випадку використання приводних валиків для обертання печі, можуть використовуватись гідравлічні приводи. Це дає змогу досягнути надзвичайно сильного обертового моменту. В багатьох процесах, дуже небезпечною є зупинка гарячої печі, у випадку проблем з приводом. Різниця температур між верхом та низом печі можуть призвести до деформації печі та пошкодженню вогнетриву. Тому, нормальною практикою вважається встановлення допоміжного приводу для використання при відключенні енергії. Це може бути невеликий електромотор з автономним живленням, або дизельний двигун. Він обертає піч дуже повільно, але достатньо швидко для запобігання пошкодженню.

Теплообмін в трубчастій печі може здійснюватись за рахунок кондукції, конвекції та випромінювання, у порядку зменшення ефективності. У низькотемпературних процесах, та в холодніших частинах довгих печей, в яких не вистачає підігріву, піч часто обладнана внутрішніми теплообмінниками для

покращення тепло-обігу між газом та матеріалом який оброблюється. Вони можуть складатися з черпаків або підіймальних пристроїв, які проносять матеріал через потік газу, або можуть бути металеві вставки, які нагрівають верхню частину печі, та передають тепло матеріалу, коли занурюються під нього під час обертання печі. Останні привабливіші, так як підіймальні пристрої підіймають багато пилу. Найбільш вживані теплообмінники складаються з ланцюгів що висять поперек потоку газу.

Таблиця 6.1 - Таблиця змащення

№ з/п	Місце змащування	Кількість точок змащування	Вид мастила	Метод змащення	Періодичність змащування
1	Підшипник ролика	14	П 28 (рідке циркуляційне)	подача мастила	1-2 л/хв
2	Вінцева шестерня, під вінцева шестерня	2	ТАТ 17	обмащення	2 рази/зміну
3	Редуктор	2	АІ 40 (індустріальне)	заливка	1 раз/рік
4	Підшипник редуктора	2	АІ 40	оприскування	1 раз/рік
5	Підшипник електродвигуна	2	УС 20	набивка	1 раз/6 міс.
6	Редуктор допоміжного приводу	2	АІ 40	заливка	1 раз/рік
7	Підшипник допоміжного приводу	2	УС 20	набивка	1 раз/6 міс.

## 7 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

### 7.1 Опис ідеї проекту

Динаміка за обсягом виконаних будівельних робіт в Україні в грошовому вираженні в 2013-2017 рр., млн. грн. (рисунок 7.1)

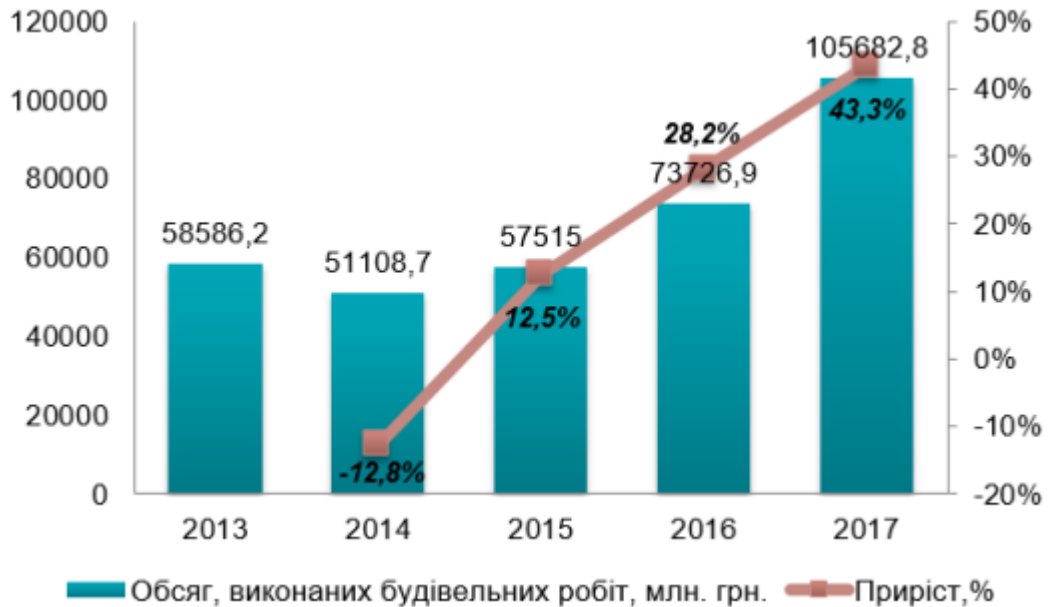


Рисунок 7.1 – Динаміка виконаних будівельних робіт в Україні в грошовому еквіваленті

Отже, необхідно на хвилі зростання обсягів будівництва покращити та здешевити продукцію, що надасть компанії значних конкурентних переваг.

Опис ідеї стартап-проекту приведено в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Користь для користувача
Відновлення та оновлення вже збанкрутілих заводів, які знаходяться на обліку громад	Нові режим роботи і конструкція обертових печей та інших трубчастих апаратів	Зменшення енерговитрат на виготовлення
		Дешева вартість приміщень
		Вища якість продукції
	Підвищення якості змішування готового продукту	Більш конкурентоспроможний продукт
		Покращення іміджу, нові робочі місця

Для виготовлення клінкеру пропонується встановлення нових двигунів на вже існуючі обертові печі.

#### **План розвитку**

2018-2019 – заснування компанії.

2018-2020 – відновлення роботоздатності підприємства, модернізація

2021-2022 – налагодження виробництва, пошук клієнтів та партнерів.

2018-2025 – реклама в різних її проявах.

2019-2032 – за цей час підприємство знаходить постійних клієнтів і стає прибутковим.

2021-2025 – відкриття заводу в Україні, націленість на розвиток закордоном, продаж франшизи.

Товарний портфель (асортимент послуг та товарів)

1. Виробництво високоякісного клінкеру та іншої сировини;
2. Ремонт типового обладнання інших підприємств;
3. Продаж повноцінних великогабаритних установок та лабораторних установок виготовлення клінкеру;
4. Експорт продукції за кордон;
5. Продаж франшизи.

Корпоративні стандарти. Позмінний графік роботи, 3 зміни на день. Можливість віддаленої роботи працівників, які спілкуються з клієнтами, за



умови достатньої продуктивності. Інтенсивна реклама по Україні, на протязі 8 місяців. Потім не нав'язлива реклама протягом 12 місяців, аналіз ефективності рекламної кампанії. Компанія має стати дистриб'ютором будівельного обладнання та готового цементного клінкеру в перші роки фінансування, щоб зменшити борг. Кожен робітник має завдання на початку дня та має свої статистики. Звісно, він звітує в кінці робочого тижня. Тиждень починається з середи. Виплата заробітної плати 4 рази на місяць. Ставка + відсоток від плану. Розвинута "горизонтальна взаємодія". Проводяться для студентів та не тільки ознайомлюванні семінари в технічних ВНЗ України.

Ресурси і обмеження: ресурсами є вже готові закинуті заводи, які закуповуються, а також необхідне для двигуни для функціонування печей та інші супутні розхідні матеріали. Перший двигун буде встановлено на експериментальну піч а другий буде досліджено, внесено поправки під наш клімат та виготовлено на самому заводі. Обмеження: якщо компанія щомісячно не в змозі продати 30-35% від задуманого, то аналізується обраний напрям розвитку компанії та корегується з врахуванням помилок. При недостатньому фінансуванні змінювати договори з постачальниками сировини, брати її під реалізацію. Кошти, які повинні бути витрачені на рекламу, витрачаються за прямим призначенням та визначаються як 14% від доходу.

Канали розподілу: продаж товарів відбувається через мережу гіпермаркетів, інтернет, а також через офіси, які розміщуються у промислових центрах великих міст. На околицях реклами більше, ніж в центрі. Продаж сировини здійснюється на взаємовигідних умовах в такі сітки магазинів як Епіцентр та Леруа Мерлен.

Поведінка споживача: споживачі звертають увагу на співвідношення якості до вартості продукту і шукають найбільш якісний продукт за найменшу вартість.

Організаційно-правова інформація:

- форма власності – приватна;
- організаційно-правова форма – товариство з обмеженою відповідальністю;

– керівництво – демократичний.

Ресурси:

- фінансові – необхідні кошти, яких вистачить на 1 рік стабільного функціонування підприємства, а також ще 14% цих коштів, які будуть використані на популяризацію і рекламу;
- складські потужності та виробничі- 2 обертові печі. Одна 4,5 на 80 метрів друга - 4,5 на 60;
- технології: використовуються обертові печі з модернізованими конструкціями. Також є регулятор економії надлишкових обертань установок, який був вдосконалений на основі німецького патенту;
- інформаційні: ЗМІ, борди, рекламні спільноти в інтернеті, новинні портали;
- трудові: В сукупності 80 людей; є 3 зміни працівників;
- інтелектуальні: значна частка працівників з досвідом роботи на аналогічних посадах протягом декількох років, програми ротації для студентів;
- правові: юридичний відділ, який налічує 8 людей.

Таблиця 7.2 - Узагальнений список інформації

№ п/п	Необхідна інформація
1	Необхідний кваліфікований персонал для грамотного обслуговування машини.
2	Простіше не допустити проблему, ніж потім вирішувати її наслідки.
3	Необхідно мати декілька планів дій при непередбачуваних обставинах, які дають конкурентну перевагу у порівнянні з іншими компаніями.
4	Задля попередження нещасних випадків, необхідно встановлювати захист на кілька рівнів вищий ніж мінімально допустимий. Також необхідно контролювати виконання норм безпеки.

Таблиця 7.3 - Аналіз маркетингового середовища підприємства

Внутрішні фактори	Вплив фактору		Симптоми проблеми та можливості
	Можливості	Загрози	
Розлад в роботі установки	Досвід, зменшення аналогічних ситуацій в майбутньому	Невиконання плану	Ситуація наявна, оскільки її не було передбачено. Потрібно проаналізувати причину її виникнення, та як її виправити
Нещасний випадок на виробництві	Встановлення додаткового захисту, приклад для інших працівників	Суд, погана репутація, ремонт установки, потрібен новий працівник	Працівник не виконав вимог техніки безпеки, контроль за їх виконанням був недостатнім. Потрібно це виправити. Тоді аналогічних випадків не буде в майбутньому
Різка зміна на ринку	Можливість випередити конкурентів, заявивши про себе унікальним товаром	Банкрутство	Відсутній план дій при такій ситуації. Однак є можливість покращити позицію на ринку та випередити конкурентів

## 7.2 Аналіз факторів макромаркетингового середовища

Таблиця 7.4 - Підсумкова таблиця чинників політико-правового середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення труднощів чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Зміна оподаткування та законодавства	Вихід на інші ринки збуту	Загроза втратити свою позицію на ринку	Потрібно надати завдання юридичному відділу знайти спосіб зменшити оподаткування. Водночас із цим потрібно визначити що може приносити більший дохід, і таким, що можна принести в жертву
Погана репутація	Піар, нові клієнти, при умові, якщо компанія буде зберігати хорошу репутацію	Погана репутація може бути довгий час, частину клієнтів буде втрачено, зменшиться прибуток, менший потік кваліфікованих кадрів на виробництво	Потрібно мати грошовий запас на рекламу, а також необхідно заручитись підтримкою авторитетних людей та рекламних кампаній
Зміна внутрішньої політики компанії	Можливість створення розуміючого дружного та колективу, такого, який допомагає, правління	Велика імовірність погіршення ситуації, яку маємо на даний момент	Перш ніж починати зміни потрібно перейняти досвід інший компаній та добре все прорахувати. Також не потрібно слідувати дуже чітко плану, адже можна зробити краще, вносячи якісь корективи в процесі роботи.
Звинувачення в порушенні чинного законодавства підприємством	Можливість знайти схеми за якими відбувається порушення, а також недобросовісний персонал та позбутися його	Погана репутація штраф. В найгіршому варіанті виробництво можуть закрити.	Щоб попередити порушення закону з боку персоналу, потрібно ретельно перевірити схему роботи підприємства

Таблиця 7.5 - Підсумкова таблиця факторів економічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення труднощів чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Економічна криза	Можливість пристосуватись до нових тенденцій, закріпитись на ринку	Велика імовірність того, що підприємство понесе великі збитки, можливо навіть закрийється	Проведення мозкових штурмів, звернення до кризис-менеджера, система заохочень для персоналу, який турбується управлінськими проблемами виробництва.
Витрати коштів, котрих можна уникнути	Експеримент: аналіз результату витрати коштів	Найгірший випадок - банкрутство	Потрібно власноруч перевіряти на найнижчих рівнях. виробництва хоча б 1 раз в 2 тижні витрати та доходи Також створити схему на підприємстві, де всі один перед одним звітують
Наявність товарного дефіциту	Можливість виробляти даний товар, або ж перепродавати	Є загроза недоотримати прибуток не знайшовши необхідний товар	Використання практики дропшипінгу на перших кроках із попереднім укладанням договору та перевіркою стану та якості товарів та послуг
Перенасиченість ринку	Чудовий шанс стати новатором у даній галузі та модифікувати надавані продукти та послуги	Можна бути непоміченим на ринку та стати банкрутом	Альтернативний метод вирішення проблеми - креативна реклама.

Таблиця 7.6 - Підсумкова таблиця факторів демографічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Чисельність населення різко зростає	Можливість збільшити обіг фінансів	Кінцевий продукт конкурентів буде відрізнитись від запропонованого нами	Проведення соц. опитувань, кредит в банку на розвиток виробництва
Популяризація сімейного стану населення	Створення сприятливих умов для працівників, враховуючи їх побажання	Зменшення продуктивності підприємства	Створення філіалу за кордоном
Міграція населення	Розвідка про галузь та її стан за кордоном	Зменшення попиту, чисельності працівників та прибутковості	Креативна реклама, зміна напряму розробки

Таблиця 7.7 - Підсумкова таблиця факторів природного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Прикута увага до забруднення довкілля	Позиціонування підприємства як екологічного	Витрата значної частини грошей, без віддачі	Можна перестати випускати певну групу товарів на даному виробництві, але почати випускати на виробництві, яке знаходиться в іншому районі чи країні
Природні катаклізми	Можливість почати все спочатку, проте з досвідом	Майже всі шанси не відновити виробництво	Запропонувавши хороші умови можна залучити гроші до реставрації виробництва з держбюджету
Відкриття нових джерел фінансів	Зміна партнерів	Сировина може бути поганої якості	Частково можна перейти на нову сировину, проте значна частина виробництва не змінюється
Підвищення вартості енергоносіїв	Перепрофілювання виробництва пошук альтернативних джерел енергії, перерозподіл коштів виробництва	Велика витрата коштів	Можна зробити диференціацію цін одних і тих самих товарів в залежності від місця продажу Ринок збуту можна змінити

### 7.3 Аналіз факторів мікроркетингового середовища

Таблиця 7.8 - Підсумкова таблиця впливу споживачів

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Споживачів цікавлять послуги, які підприємство не надає	Доцільно розширити спектр послуг	Потік клієнтів може не відповідати розрахункам	Закупка невеликої кількості товарів для швидкого збуту Розширення спектру послуг на декілька одиниць.
Споживачі скаржаться на високу ціну	Пошук шляхів надавати послуги та товари за нижчою ціною, з мінімальним Негативним впливом на прибуток	Можна втратити велику частину клієнтів, якщо нічого не змінювати	Впровадження системи знижок для постійних покупців.
Споживачі скаржаться на погану якість товарів чи послуг	Покращення вже існуючих товарів створення нових	На пошук причин поганої якості може бути витрачено великий проміжок часу	Консультація з кваліфікованим фахівцем, який працював на багатьох етапах виробництва продукції
Невисокий попит на продукцію	Збільшити попит та прибуток в результаті переорієнтації виробництва	Зменшення клієнтури	Необхідно почати співпрацю з суміжними підприємствами Вдалий час для запуску рекламної кампанії

Таблиця 7.9 - Підсумкова таблиця впливу конкурентів

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Випуск конкурентами унікального товару	Можливість випуску унікальної продукції, який би конкурував з над прибутковими товарами	Перехід клієнтури до конкурентів	Створення фірми-дистриб'ютора та перепродаж товарів конкурентів. Дослідження плюсів та мінусів над прибуткових товарів конкурентів з метою випуску подібних товарів під власним брендом.
Випуск конкурентами продукції, яка дуже схожі на товари нашої компанії	Можливість зайняти передову позицію на ринку, якщо обґрунтувати переваги власного продукту перед іншими та популяризувати його	Товар конкурентів може виштовхнути з ринку товар нашої компанії	Запропонувати ЗМІ за великим торговельним мережам вигідні умови співпраці.
Зміна конкурентами іміджу компанії	Можливість показати переваги компанії	Занадто потужна пропаганда негативного іміджу стосовно нашої компанії.	Визнання негативних сторін компанії як дійсних та запуск рекламної кампанії, де говориться про усунення виявлених недоліків та випуск хорошого продукту.
Промисловий шпідонаж конкурентами в нашій компанії	пропаганда негативної репутації для конкурентів	Втрата та цінної інформації цінного продукту, які в руках конкурентів значно знизять прибутки нашої компанії	Жорсткий контроль пропускового режиму Проведення власного шпідонажу на компанії, ретельний відбір кваліфікованих кадрів.



Таблиця 7.10 - Підсумкова таблиця впливу контактних аудиторій

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Нейтральна стаття про компанію в журналі	Збільшення клієнтури за рахунок піару	Загострення конкуренції із схожими підприємствами	Збільшення позитивних статей про компанію, які компанія буде фінансувати. Це призведе до збільшення клієнтури.
“Роздуття” негативних сторін компанії	Переорієнтація підприємства задля зведення негативних сторін до мінімуму.	Зниження замовлень в компанії Зменшення клієнтури та	Невдалий продукт не варто більше випускати, але можна випустити продукт, з врахованими недоліками попереднього продукту.
Розкриття в ЗМІ секрету технологічної схеми виробництва	Переорієнтація виробництва Піар для компанії та	Банкрутство компанії	Пропаганда інформації, яка б спростовувала розповсюдженню процесу виробництва продукції.
Контактні аудиторії не помічають наше підприємство	Можливість гучно про себе заявити, нестандартно поводитись на ринку	Загроза бути непоміченим та недотримувати прибутків	Можливість заснування власного рекламного агентства

Таблиця 7.11 - Формулювання управлінської проблеми

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Легко залучити ЗМІ, оскільки кінцевий продукт є унікальним з точки зору матеріалу.</li> <li>- Є декілька постачальників сировини, які співпрацюють з нашою компанією.</li> <li>- Конкурентна перевага у технології виробництва продукту.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Потрібне залучення інвестицій.</li> <li>- У компанії немає авторитету на ринку, а тому і немає довіри.</li> <li>- Проведення науково-дослідницьких робіт не гарантує результату у вигляді нового продукту.</li> </ul>
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Можливість залучати інвесторів, нарощувати фінансову вагу акцій компанії.</li> <li>- Можливість виконувати замовлення та позиціонувати компанію в якості дистриб'ютора.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Банкрутство підприємства, або заборгованість впродовж довгого часу.</li> <li>- Інвестори будуть диктувати не вигідні для компанії умови.</li> <li>- Будь-який інцидент у компанії, спричинений через недотримання технік безпеки, одразу відлякає потенційних інвесторів та клієнтів.</li> </ul>

Управлінська проблема: відсутність репутації компанії та унікальних товарів, яка б дала монополізацію ринку.

Альтернативні шляхи вирішення управлінської проблеми/реалізації управлінської можливості: об'єднання під одним брендом існуючих малих компаній, співпраця з відомим брендом для створення кредиту довіри, мінімізація витрат шляхом використання та розвитку інтернет-ресурсів, залучення для вирішення управлінської проблеми кризис-менеджера, спонсорство у заходах, що цікавлять потенційних клієнтів.

Таблиця 7.12 - Сильні та слабкі сторони альтернативних шляхів.

Альтернативи	Слабкі сторони	Сильні сторони
1. Об'єднання під одним брендом існуючих малих компаній.	Ризик відмови компаній до об'єднання. Складність даного розвитку подій	Створення пізнаваного бренду без додаткових затрат на рекламу. Потужний конкурент на ринку.
2. Співпраця з відомим брендом для створення кредиту довіри.	В рекламі зацікавлена тільки наша компанія. Швидше за все не вигідні умови співпраці для нас.	Якісно нові клієнти, збільшення доходу при сталому числі філіалів компанії.
3. Мінімізація витрат за рахунок розвитку та використання інтернет ресурсів.	Хороший інтернет сайт та його оптимізація в пошукових мережах коштує дорого. Підтримка коштуватиме набагато дешевше.	Створення клієнтської бази, можливість планувати свої витрати та закупки. Служба консультації в телефонному режимі, клієнтура в мережі інтернет,
4. Залучення до вирішення управлінської проблеми кризис-менеджера.	Є ризик, що проблема вирішена не буде, або після вирішення проблеми виявиться ще одне неявна проблема. Консультація кризис-менеджера фінансово може бути невиправданою, а також кризис-менеджера знайти непросто.	При грамотній співпраці з кризис-менеджером управлінська проблема має високі шанси на вирішення.

Найоптимальніший шлях вирішення управлінської проблеми - інтенсивний розвиток інтернет-сайту та співпраця з уже відомим брендом. Що дасть змогу створити зручний онлайн-сервіс, якому можна довіряти. Результат не змусить довго чекати на себе. Масове надходження нових клієнтів буде вже у першому кварталі після запуску сайту або іншого рекламного ходу, де вказано відоме ім'я іншої компанії котра співпрацює з нами.

## 8 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

### 8.1 Техніка безпеки при роботі на обертовій печі

Охорона праці – це система законодавчих актів та законів, відповідних економічних, механічних та санітарно-технічних норм, націлених на збереження життя та здоров'я працівників підприємств.

Завдання охорони праці – мінімізувати виробничий травматизм та професійні захворювання.

Шкідливі виробничі фактори представлені у таблиці 8.1

Таблиця 8.1 – Шкідливі виробничі фактори

Хімічні	Фізичні	Біологічні	Психофізіологічні
токсичний пил; хімічні гази; хімічні викиди;	пил; шум; освітленість; вібрації; випромінювання; температура; вологість; тиск;	бактерії; віруси; мікроорганізми;	нервові перевантаження; стреси; монотонність праці;

### 8.2 Характеристика видів шкідливих виробничих факторів

#### 1. Мікроклімат

$t = 18 - 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (для цехів  $14 - 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

$W = 40 - 60 \%$

$P = 760$  торр

#### 2. Освітленість – розподілення світлового потоку по робочій зоні:

– наявність двох джерел світла – природного та штучного;

– рівномірність освітлення;

– відсутність мерехтінь та яскравих спалахів

Норма освітленості – до 30 люкс/м<sup>2</sup>

3. Шум – це поєднання звуків різної частоти та сили, які присутні на робочому місці.

Звукова шкала:

– до 20 дБ – рівень шепоту;

– до 40 дБ – рівень розмовної мови;

– до 85 дБ – рівень виробничого шуму;

– до 130 дБ – рівень нестерпного шуму;

– до 180 дБ – рівень «втоми металу».

4. Вібрації – це коливання різноманітних хвильових процесів, які відбуваються за певних фізичних навантажень.

Ознаки вібраційної хвороби:

– часті головні болі, запаморочення, непритомність;

– вушні та носові кровотечі, нервові стреси;

– відхилення від прямоходіння, нервові типи;

– інсульт, інфаркт, параліч організму.

### **8.3 Необхідні вимоги до виробничих процесів та устаткування**

1. Виробниче устаткування повинно відповідати вимогам безпеки згідно ДС 12.2. 003-74.

2. Виробниче устаткування повинно відповідати вимогам безпеки протягом усього терміну експлуатації.

3. Безпека виробничого устаткування повинна забезпечуватися:

– вибором принципів дії, конструктивних схем, безпечних елементів конструкцій тощо;

– застосуванням у конструкції засобів механізації, автоматизації й дистанційного керування;

– застосуванням у конструкції засобів захисту;

– виконанням ергономічних вимог;

– включенням вимог безпеки в технічну документацію з монтажу, експлуатації, ремонту, транспортуванню й зберіганню.

4. При експлуатації виробничого устаткування, що виділяє шкідливі речовини, склад цих речовин у повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій, встановлених ДС 12.1. 005-76. Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони обов'язкові для всіх робочих місць незалежно від їхнього розташування (на відкритих площадках, у виробничих приміщеннях, у гірських виробітках, на транспортних засобах тощо).

5. Виробничі процеси повинні відповідати вимогам безпеки за ДС 12.3. 002-75 зі змінами.

6. Безпека виробничих процесів повинна бути забезпечена:

- вибором вихідних матеріалів, заготовок і напівфабрикатів;
- вибором виробничого устаткування, розміщенням виробничого устаткування й організацій робочих місць;
- розподілом функцій між людиною й устаткуванням з метою обмеження тяжкості праці;
- вибором способу зберігання й транспортування вихідних матеріалів, заготовок, напівфабрикатів, готової продукції й відходів виробництва;
- професійним відбором і навчанням працюючих;
- застосуванням засобів захисту працюючих;
- включенням вимог безпеки в нормативно-технічну й технологічну документацію.

7. Під час організації й проведенні технологічних процесів повинно бути передбачено:

- усунення безпосереднього контакту працюючих з вихідними матеріалами, заготовками, напівфабрикатами, готовою продукцією й відходами виробництва, що чинять шкідливий вплив;
- заміна технологічних процесів і операцій, пов'язаних з виникненням небезпечних й шкідливих виробничих факторів, процесами й операціями, при яких зазначені фактори відсутні або мають меншу інтенсивність;

- своєчасне одержання інформації про виникнення небезпечних й шкідливих виробничих факторів на окремих технологічних операціях;
- наявність системи контролю й керування технологічним процесом, яка забезпечує захист працюючих й аварійне відключення виробничого устаткування;
- своєчасне видалення й знешкодження відходів виробництва, що є джерелами небезпечних й шкідливих виробничих факторів.

Вимоги безпеки до технологічного процесу повинні бути викладені в технологічній документації.

8. Склад шкідливих речовин у викидах виробничих процесів не повинен викликати збільшення концентрацій шкідливих речовин у атмосферному повітрі населених пунктів і у водоймах санітарно-побутового водокористування вище гранично припустимих величин, встановлених затвердженими Держбудом, Санітарними нормами проектування промислових підприємств (СН 245-71).

#### **8.4 Необхідні вимоги та попередження при роботі з устаткуванням**

Для безпечної роботи обертової печі необхідно:

- 1.1 Для обслуговування допускаються особи, що знають конструкцію й правила техніки безпеки.
- 1.2 Силу й освітлювальну мережу виконати в металевих трубах.
- 1.3 Забезпечити достатнє освітлення робочих місць.
- 1.4 Не допускати загромадження робочих місць іногородними тілами, забезпечити доступ до печі з усіх боків.
- 1.5 При роботі на висоті більше одного метра користуватися драбиною.
- 1.6 При виявленні несправностей у печі запускати її в роботу категорично забороняється.
- 1.7 При роботі відключити привід печі від мережі й на щитку керування повісити табличку з написом – включати заборонене.
- 1.8 Ремонт проводиться при температурі +35°C

1.9 В огляді й ремонті в середині печі повинне працювати не менше двох чоловік, одягнені в спец одяг, після достатньої вентиляції корпусу. При цьому обов'язково вивіщується табличка –У барабані люди.

1.10 При огляді й ремонті використовується переносне висвітлення напругою не більше 12 вольтів.

1.11 Під час пуску й зупинки механізмів повинні подаватися звукові сигнали.

1.12 Ремонт електроустаткування й проводки дозволяється лише електрикам.

1.13 Пускове оснащення й обертова піч повинні бути надійно заземлені.

1.14 Робочі площадки й драбини з метою безпеки й зручності обслуговування повинне надійно кріпитися; площадки повинні мати ширину не менше 55см і огорожною висотою один метр. По периметрі площадки на рівні настилу встановлюється суцільне обшивання висотою 150см. Між обшиванням і поруччям на висоті 500см від настилу встановлюється додаткова загороджувальна планка. Настил на робочих площадках і переходах варто робити із суцільних металевих рифлених листів, або зі спеціальних ґрат. Драбина повинна мати зручні поручні.

Підготовка до роботи й проведення роботи.

2.1 Провести огляд стану й порядку роботи електроустаткування приладів і правильність їхнього змащення.

2.2 Обкатати барабан у холодному стані без завантаження матеріалами протягом 3...6 годин.

2.3 Виконати обкатування барабана під навантаженням з подачею гарячих газів з поступовим досягненням продуктивності й кінцевою вологістю обробляє мого матеріалу до проектного. Гаряче обкатування виконується протягом 24 годин.

2.4 Пуск барабану забороняється при:

- ослаблення кріплень деталей приводу, опор, порушеннях цілісності корпусу;

- наявність вібрації й поштовхів елементів приводу й опорних вузлі.

При проектуванні нової техніки і модернізації вже існуючої повинні цілком враховуватися вимоги діючого законодавства по охороні праці і навколишнього середовища.

Охорона праці і навколишнього середовища містять у собі питання безпеки праці, усунення причин травматизму і попередження професійних захворювань, аварійних ситуацій на виробництві; питання правової охорони праці.

Усіляке забезпечення нормальних умов праці – одна з найважливіших задач підйому народного добробуту. Її рішення йде на основі комплексної механізації й автоматизації важких і шкідливих виробничих процесів, широкого впровадження сучасних засобів безпеки, створення на виробництві нормальних санітарно-гігієнічних і побутових умов.

Модернізована у даному дипломному проєкті обертова піч застосовується в промисловості будівельних матеріалів і призначена для виробництва бетону сухим способом.

У процесі розробки даного розділу повинні бути розглянуті і розроблені заходи щодо наступного питань охорони праці:

- повітря робочої зони;
- виробниче освітлення;
- небезпека враження електричним струмом;
- виробничий шум;
- небезпека впливу що рухаються й обертаються частин установки;
- пожежна безпека.



## 8.5 Повітря робочої зони

Робота машиніста по обслуговуванню обертової печі відноситься до категорії легких фізичних робіт з ГОСТ 12.1.005-88 з енерговитратами 630 кДж/год. Приміщення відноситься до приміщень без надлишку явного тепла до  $84 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{год}$ .

Фактичні параметри метеоумов відповідають нормам ГОСТ 12.1.005-88 і забезпечуються наступними заходами:

- у холодний час року підігрів приміщення батареями з теплоносієм водою, нагрітої до  $t 60^\circ \text{C} \pm 5^\circ \text{C}$ ;

- у теплий час року загальнообмінною вентиляцією через верхні прорізи вікон, через двері.

Кімната оператора управління знаходиться в приміщенні. Розміри кімнати:

$S=6 \times 12 \times 4=288\text{м}$  Туди може попадати цементний пил.

$288 \times 4=1152\text{м}$  – збільшуємо на 10-30%

$1152\text{м}=1500\text{м}$

Вентилятор МЦ-4, кількість оборотів  $n=1410$ , КПД=0,35

Продуктивність дорівнює 1500м у відповідності з СНіП 2.04.05-84 – для вентилятора.

## 8.6 Виробниче освітлення

У денний час виробниче приміщення освітлюється природним світлом. Для цього вибирається бічне освітлення, через світлові прорізи в зовнішніх стінах. Розміри вікон  $15 \times 20\text{м}$ , їх кількість 10. КПО=1,6%.

Згідно СНіП II-4-79, робота з обслуговування устаткування відноситься до VI розряду підрозряду «а», тобто загальне спостереження за технологічним процесом. При цьому робоче місце машиніста обертової печі повинне мати освітленість робочої зони  $E_{\text{нор}}=150 \text{ лк}$ .

Устаткування працює в 3 зміни, виробництво безперервне. У темний час доби у приміщенні застосовується загальна освітленість люмінесцентними лампами ЛДЦ-40, їх кількість 55 з потужністю 40 Вт, світловим потоком  $F = 2100$  лм і освітленістю  $E_f = 100$  лк..

Знайдемо світловий потік:

$$F = \frac{150 \cdot 1.4 \cdot 600 \cdot 1.15}{55 \cdot (32/100)} = 8232.9 \text{ (лм)} \quad (8.1)$$

$$E_f = \frac{FN\eta}{Sk_3\alpha} = 151.2 \quad (8.2)$$

Визначивши світловий потік однієї лампи, вибираємо газорозрядні лампи типу ДРЛ-250 потужністю 250 Вт, світловим потоком  $F=1900$  лм (з відхиленням від розрахункового світлового потоку на 8%, що допускається) при напрузі 220

Тоді фактична освітленість буде  $E_f=160$ , що і відповідає СНіП П4-79.

## 8.7 Електробезпека

Приміщення, в якому працює оператор по обслуговуванню обертової печі, відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою враження електричним струмом.(ПУЕ)

1. Для живлення установки використовується трифазна напруга 220/380 В та з частотою 50 Гц. з ізоляцією.

2. Основні причини нещасних випадків від дії електричного струму:

- випадковий дотик, наближення на небезпечну відстань до струмопровідних частин, що перебувають під напругою
- поява напруги дотику на металевих конструктивних частинах електроустаткування у результаті пошкодження ізоляції або з інших причин;
- поява напруги на відключених струмопровідних частинах, на яких працюють люди, внаслідок помилкового включення установки;

– виникнення напруги кроку на поверхні землі через замикання проводу на землю.

Для приміщень з підвищеною небезпекою характерно наявність одної з наступних умов: сирість чи струмопровідячий пил; струмопровідяча підлога, висока температура; можливість одночасного дотику людини до маючих з'єднання з землею технологічних апаратів, механізмів і т. п. – з однієї сторони, і до металевих корпусів електрообладнання - з другої.

Безпека експлуатації електрообладнання забезпечується комплексом заходів, які можна поділити на три класи:

1. Технічні захисні заходи, які запобігають дотик людини до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою. Дані заходи не допускають людину у небезпечну зону, де діють небезпечні та шкідливі виробничі фактори. До них відносяться: огорожі, висота розміщення не огорожених струмоведучих частин, ізоляція струмоведучих частин, блокування, зорова інформація про небезпеку.

2. Технічні захисні заходи, які знижують ступінь поразки людини при дотику його до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, ізолюючі штанги, кліщі, діелектричні рукавиці, діелектричне взуття, ізолюючі коврики.

3. Організаційні захисні заходи.

Організаційні захисні заходи складаються з вимог технічної експлуатації та технічної безпеки при організації обслуговування електричних мереж та електроустановок.

Вимогою до персоналу є оцінка придатності персоналу при прийманні на роботу та періодичного медичного посвідчування.

Організаційними заходами, що забезпечують безпеку при виконанні робіт у електроустановках є: оформлення роботи, допуску до роботи, нагляд під час роботи, оформлення перерв та переведень на інші види робіт.

Обов'язковим заходом захисту у приміщеннях з підвищеної небезпекою є захисне заземлення, що усуває небезпеку поразки людей електричним

струмом при появі напруги на конструктивних частинах електрообладнання, тобто при замиканні на корпус.

У вибухонебезпечних приміщеннях заземлення електроустановок виконується при будь-якій напрузі живлення.

Захисне заземлення - навмисне з'єднання неструмоведучих металевих частин електрообладнання, які можуть опинитись під напругою, з землею або її еквівалентом для захисту людей та тварин.

З'єднання металевих струмоведучих частин обладнання з землею здійснюється за допомогою заземлюючого пристрою. Заземлюючим пристроєм називається сукупність заземлювача (металевих провідників, що знаходяться у безпосередньому співдотику з землею,) та заземлюючих провідників, що з'єднують заземлюючі частини електроустановки з заземлювачем.

У випадку, якщо заземлення є ненадійним чи важко виконуючим заходом, застосовується захисне відключення, що забезпечує автоматичне вимикання електроустановки при виникненні в ній небезпеки поразки електричним струмом. Така небезпека може виникнути, зокрема, при замиканні фази на корпус електрообладнання, при зниженні опору ізоляції фаз відносно землі, нижче визначеної межі, дотику людини до струмоведучої частини, що знаходиться під напругою.

## **8.8 Виробничий шум**

Тому що робота обертової печі зв'язана з механічними рухами, те неминуче виникають шуми, що шкідливо впливають на слуховий апарат людини.

Основними джерелами шуму є:

- електродвигуни приводів;
- зубчасті передачі;
- ланцюгові передачі;
- редуктора;

Рівень звукового тиску в октавних смугах частот рівня звуку й еквівалентні умови звуку для постійних робочих місць, при працюючій печі не повинні перевищувати припустимих величин, установлених за ДСН 3.3.6.037-99.

Тому що при роботі обертової печі шуми непостійні, те максимально встановлені рівні звуку на робочих місцях відповідають величині 80 дБ. При такому рівні звуку забезпечується збереження слуху працюючих протягом 20 років.

При роботі обертової печі рівень звуку досягає значення 75 дБ. Таким чином, фактичний рівень звуку нижче, ніж припустимий.

### **8.9 Небезпека впливу частин установки, що рухаються й обертаються**

Небезпечними що рухаються й обертаються частинами обертової печі є:

- корпус печі;
- бандаж;
- відкрита зубчаста передача;
- муфта головного редуктора;
- муфта допоміжного редуктора;
- гідромуфта;
- опорні ролики;

Ці механізми є небезпечними, тому що можливе нанесення механічних травм. З метою запобігання травм встановлені огороження і захисні кожухи.

Для огороження використовуємо зварені з прутів у виді ґрат екрани.

Обертові механізми двигунів і муфт встановлені в нерухомих кожухах.

### **8.10 Пожежна безпека**

Специфічною небезпекою печі являється можливість утворення та вибуху газу внаслідок пошкодження трубопроводів. Суміш газу з повітрям

являється вибухонебезпечною при певному процентному співвідношенні газу в суміші.

Мінімальний та максимальний зміст горючого газу в газоповітряній суміші, у межах яких може відбутися вибух, називаються відповідно нижніми та верхніми межами вибуху. Межі вибуху для різних вуглеводневих газів неоднакові. Чим більше у газі важких вуглеводнів, тим вужчі межі вибуховості

Правила безпеки обслуговування окремих агрегатів чи пристроїв повинні бути викладені в інструкції по експлуатації кожного агрегату. До числа загальних вимог відносяться такі.

1. Всі лотки та канали обрамлені кутовим залізом і перекриті листами заліза або залізобетонними плитами.

2. Усі ями, заглиблення, отвори в підлозі та міжповерхових перекриттях, переходи та містки повинні бути обгороджені поручнями висотою не менше 1м

Пожежна безпека відповідно до ГОСТ 12.1.004-91 забезпечується системами запобігання пожежі, пожежного захисту, організаційно технічними заходами.

Система запобігання пожежі від електроустаткування містить у собі контроль і профілактику електроізоляції, наявність плавких вставок і запобіжників в електроустаткуванні, використання заземлення для захисту від статичної напруги.

Система пожежного захисту передбачає аварійне відключення й перемикання апарату; наявність первинних засобів пожежогасіння в тому числі вогнегасників типу ОУ або порошкових вогнегасників; систему оповіщення, світлову й звукову сигналізацію; захист легкозаймистих частин устаткування вогнезахисними матеріалами; використання не горючих матеріалів для акустичної обробки стін і стель; установку автоматичної системи пожежного захисту в приміщеннях, де немає робітника персоналу; розміри дверей робочого приміщення (евакуація персоналу при пожежі) наступні : ширина дверей не менш 1.5 м; висота дверей не менш 2.0 м; - ширина

коридору 1.8 м; робочі приміщення повинні мати два виходи; відстань від найбільш вилученого робочого місця не повинне перевищувати 100 м (СНіП 2.09.02-85)

Організаційні міри пожежної профілактики

1. навчання персоналу правилам пожежної безпеки;
2. наявність необхідних інструкцій і плакатів, плану евакуації персоналу у випадку пожежі.

Приміщення обертової печі відноситься до пожежонебезпечних. Оскільки в приміщенні використовуються прилади з високою температурою, то його варто віднести до категорії "В" пожежонебезпечних приміщень. Клас пожежонебезпеки П1 оскільки в приміщенні знаходяться електроустановки. Приміщення обертової печі можна віднести до вибухобезпечного.

Виробничі приміщення згідно СНіП 2.01.02-85 "Протипожежні норми", є I або II ступенів вогнестійкості.

Необхідно оснастити приміщення первинними засобами пожежогасіння: внутрішніми пожежними водопроводами, ручними і 47 пересувними вогнегасниками, сухим піском, азбестовими ковдрами. Пожежні крани повинні бути встановлені в коридорах, на площадках сходових кліток, у входів. Щити протипожежного захисту повинні бути оснащені ручними вуглекислотними вогнегасниками, тому що для даного класу приміщень рекомендується використовувати хімічні засоби гасіння пожежі. Для гасіння пожеж у замкнутих обсягах, яким і є приміщення техвідділу, застосовують вуглекислий газ для припинення подачі кисню повітря до вогнища загоряння.

Первинними засобами пожежогасіння можуть послужити ручні вогнегасники типу: ОУ-5 і ОУ-8. У приміщенні як первинні засоби пожежогасіння передбачені порошкові вогнегасники типу ОПС-6, однак їхнє застосування може зробити значний збиток у наслідку псування дорогої електронної апаратури, тому рекомендується застосовувати пінний вогнегасник типу ОХП-10.

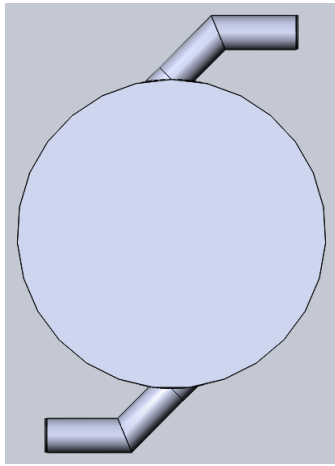
## **9 МОДЕРНІЗАЦІЯ ВУЗЛА ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ З ПІДВОДУ ПОВІТРЯ**

### **9.1 Розробка 3D моделей базової і модернізованої конструкцій вузла обертової печі з підводу повітря**

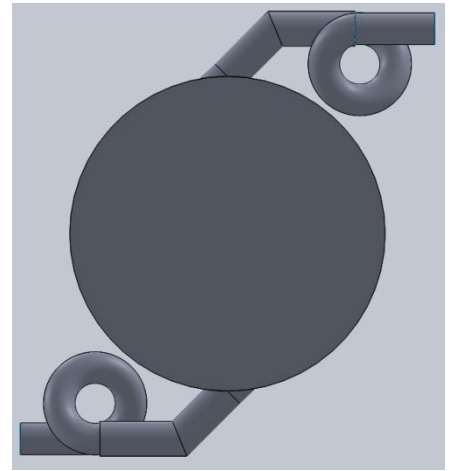
Для визначення працездатності модернізованого вузла з підводу повітря в зону прожарювання печі та його переваг порівняно з базовою конструкцією необхідно розробити цілу низку числових моделей фізичного стану обладнання, які є більш наближеними до реальних конструкцій та більш складними порівняно з моделями наведеними у розділі 5. До цих 3D моделей відносяться такі: дискретна модель динаміки сипкого середовища в обертовій печі зі встановленою системою подачі повітря різної конструкції, гідродинамічні моделі вузлів для подачі повітря в зону прожарювання та робочого простору обертової печі з вузлами подачі повітря, тепло-гідродинамічна та термомеханічна моделі обертової печі з системою подачі повітря в зону прожарювання. Така велика кількість числових моделей фізичного стану обертової печі перш за все спричинена великою складністю задачі математичного опису процесів [14,15], що відбуваються в ній. Саме тому в дисертаційній роботі для розв'язання такої складної задачі запропоновано її поділ на більш прості, але пов'язані між собою задачі. Для побудови твердотільних геометричних моделей для розв'язання вказаних задач використано CAD-систему SolidWorks [16].

Твердотільні моделі для моделювання динаміки сипкого середовища в обертовій печі зі встановленою системою подачі повітря різної конструкції наведено на рисунку 9.1.





*a*

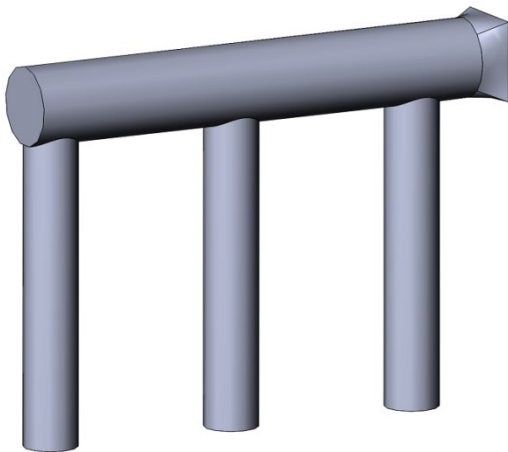


*б*

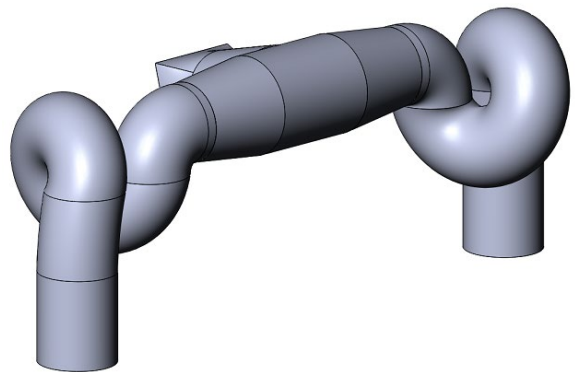
*a* – схема подачі через нахилені повітропідвідні патрубки; *б* – схема подачі через об’ємні спіральні повітропідвідні патрубки

Рисунок 9.1 – Твердотельні моделі для числового моделювання динаміки сипкого середовища в обертовій печі з подачею повітря в зону прожарювання

Твердотільні моделі для числового аналізу гідродинамічного стану колекторів для подачі повітря в обертову піч наведено на рисунку 9.2.



*a*



*б*

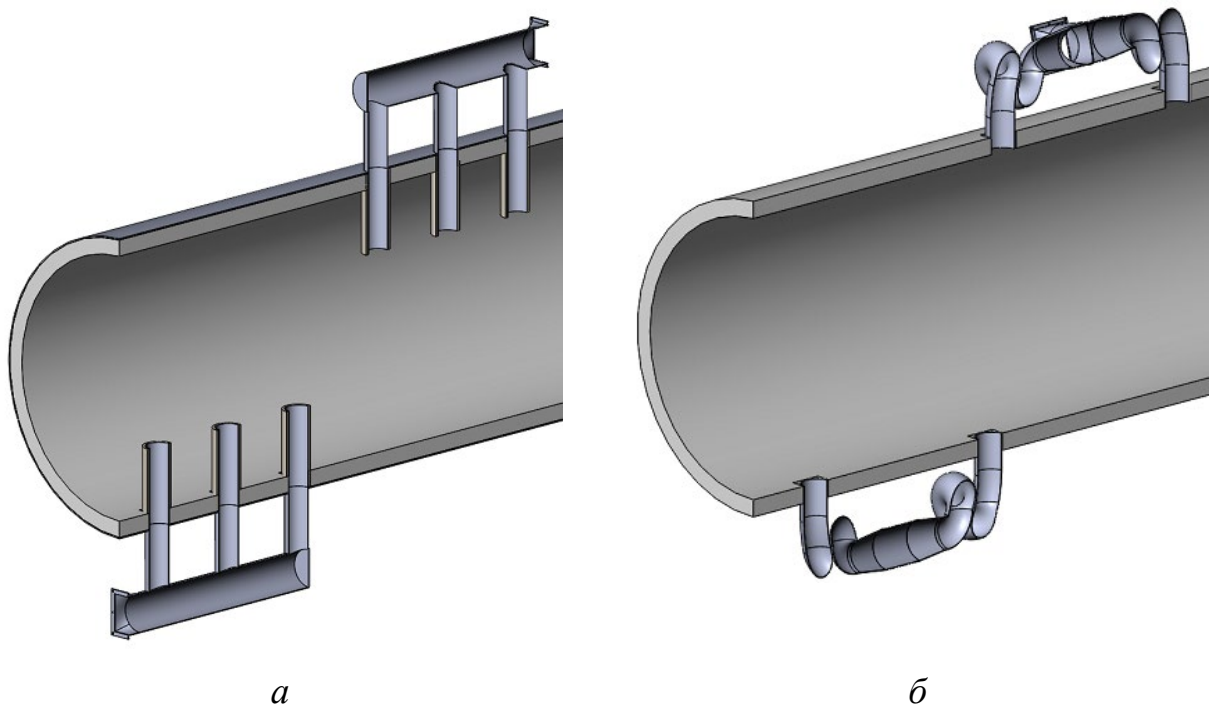
*a* – базова конструкція з розмірами труб  $d_{in}/d_{out}=190/200$  мм;

*б* – модернізована конструкція з розмірами труб  $d_{in}/d_{out}=225/235$  мм за заявкою

[17]

Рисунок 9.2 – Твердотельні моделі для числового моделювання гідродинамічного стану колекторів для подачі повітря в обертову піч

Твердотільні моделі для моделювання гідродинамічного стану обертової печі з колекторами для подачі повітря наведено на рисунку 9.3.



а – базова конструкція з розмірами труб  $d_{in}/d_{out}=190/200$  мм;

б – модернізована конструкція з розмірами труб  $d_{in}/d_{out}=225/235$  мм за заявкою  
[17]

Рисунок 9.3 – Твердотільні моделі для числового моделювання гідродинамічного стану обертової печі з колекторами для подачі повітря

Твердотільна модель для числового аналізу тепло-гідродинамічного стану робочого простору обертової печі з системою подачі повітря в зону прожарювання наведено на рисунку 9.4.

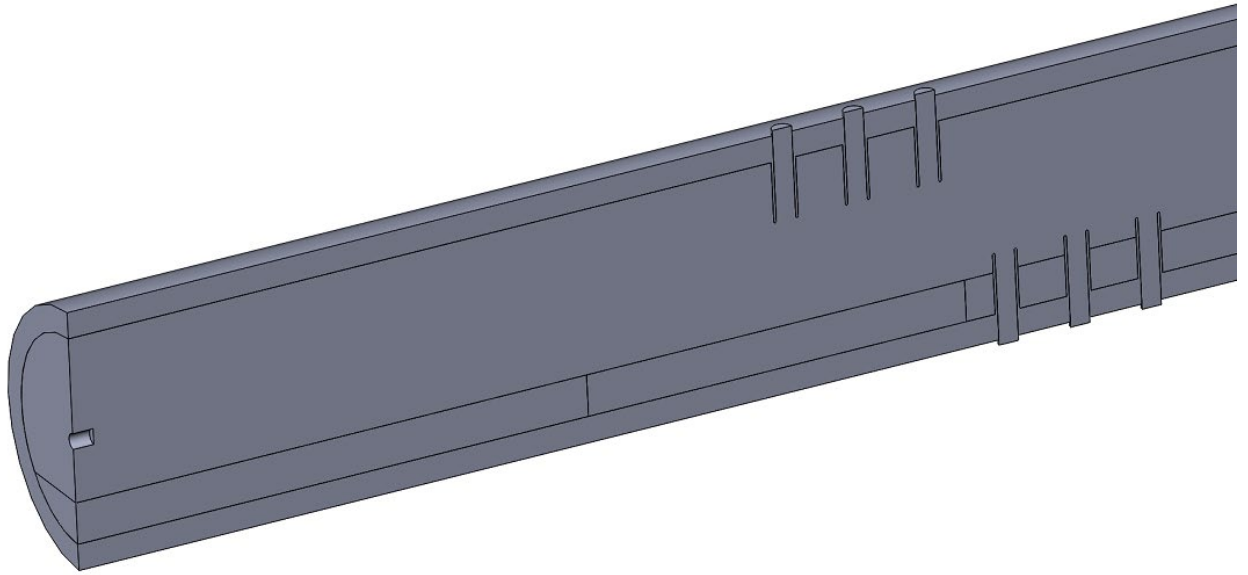


Рисунок 9.4 – Твердотільна модель для моделювання тепло-гідродинамічного стану робочого простору обертової печі з системою подачі повітря в зону прожарювання

Твердотільна модель для числового аналізу термомеханічного стану (напружено-деформованого стану (НДС)) обертової печі з системою подачі повітря в зону прожарювання наведено на рисунку 9.5.

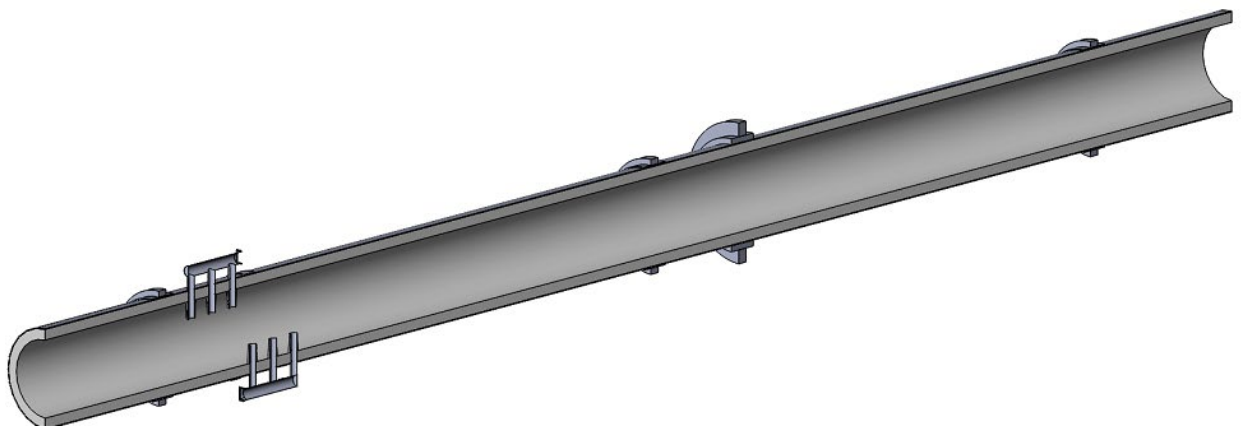


Рисунок 9.5 – Твердотільна модель для моделювання напружено-деформованого стану обертової печі з системою подачі повітря в зону прожарювання

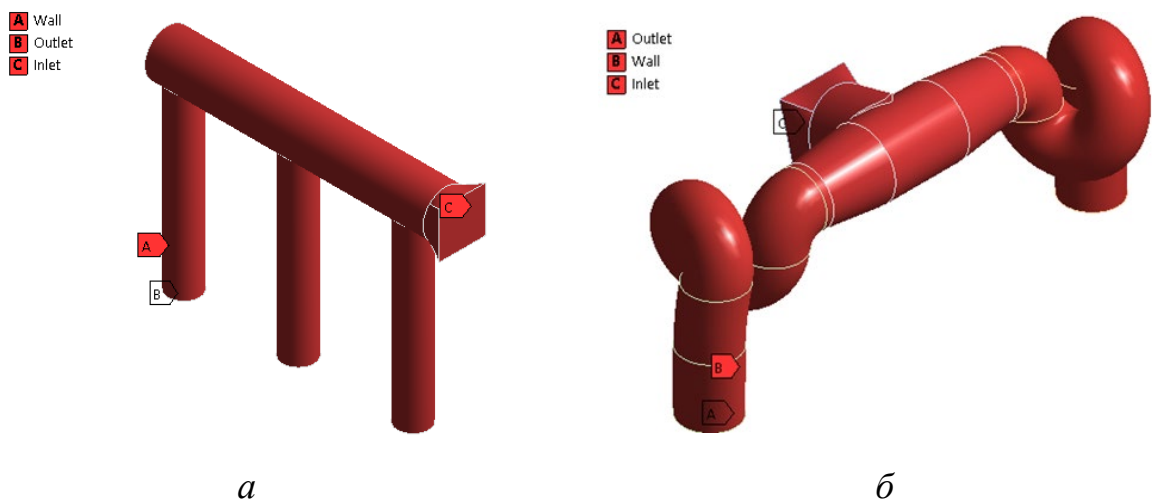
## 9.2 Числові моделі та результати розрахунків фізичного стану базової та модернізованої конструкцій вузла обертової печі з підводу повітря.

### Визначення критичних параметрів

Для побудови числових моделей обертової печі та її вузлів використано таке програмне забезпечення (ПЗ): для числового моделювання динаміки сипкого середовища – вільно відкрите ПЗ LIGGGHTS [18], а для числового моделювання гідродинамічного, тепло-гідродинамічного та термомеханічного стану – ПЗ ANSYS (Workbench, Designer Modeler, Fluent, Steady-State Thermal, Static Structural)[19].

Числова модель ПЗ LIGGGHTS являє собою текстовий файл (додаток В), в якому задано тип задачі, розміри (гранулометричний склад) та фізичні властивості сипкого матеріалу, завантажуються файли геометрії поверхонь моделі (типу \*.stl), задаються початкові і граничні умови тощо.

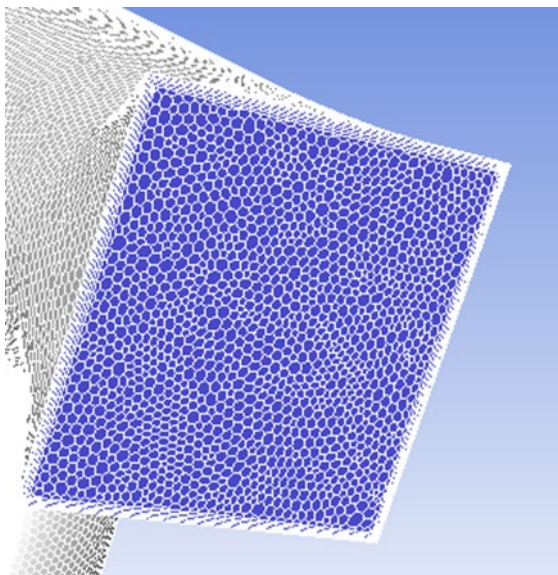
Числові моделі гідродинамічного стану колекторів для подачі повітря в обертову піч зі схемами навантаження наведено на рисунку 9.6, а результат дискретизації цих моделей на рисунку 9.7.



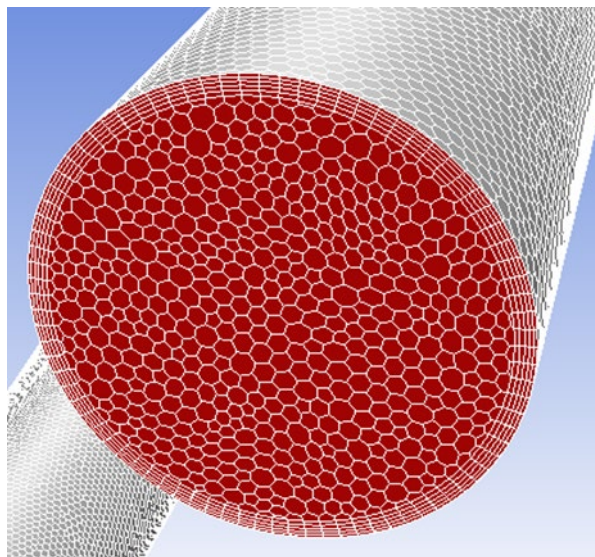
*a* – базова конструкція; *б* – модернізована конструкція за заявкою [17]

Рисунок 9.6 – Числові моделі гідродинамічного стану колекторів для подачі повітря в обертову піч зі схемами навантаження

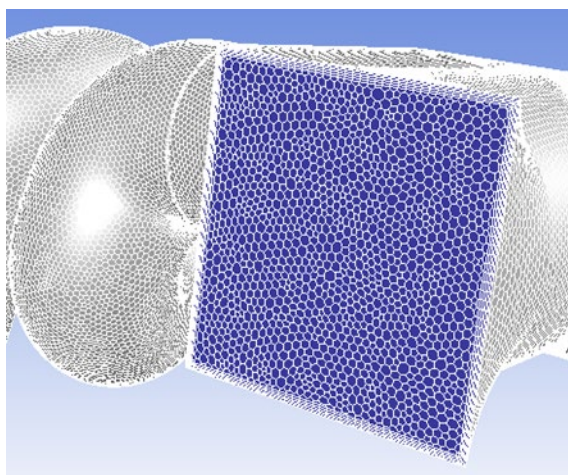




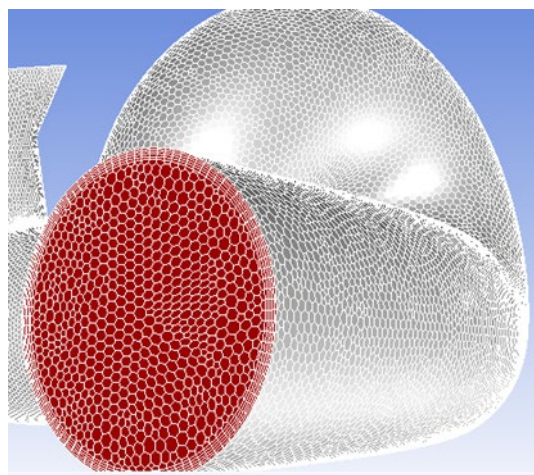
*a*



*б*



*в*



*г*

*a, б* – базова конструкція; *в, г* – модернізована конструкція

Рисунок 9.7 – Дискретизація числових моделей гідродинамічного стану колекторів для подачі повітря в обертову піч з використанням полігдронів та формуванням пограничного шару

Тут і далі за текстом дискретизація гідродинамічних числових моделей спочатку виконувалася тетраедрами, які далі трансформувалися у полігдрони, що дало змогу зменшити кількість невідомих задачі у 3 і більше разів.

Фізичні властивості повітря і димових газів, що використовуються в розрахунках гідродинамічного стану колекторів для подачі повітря в обертову піч, наведено в таблиці 9.1.

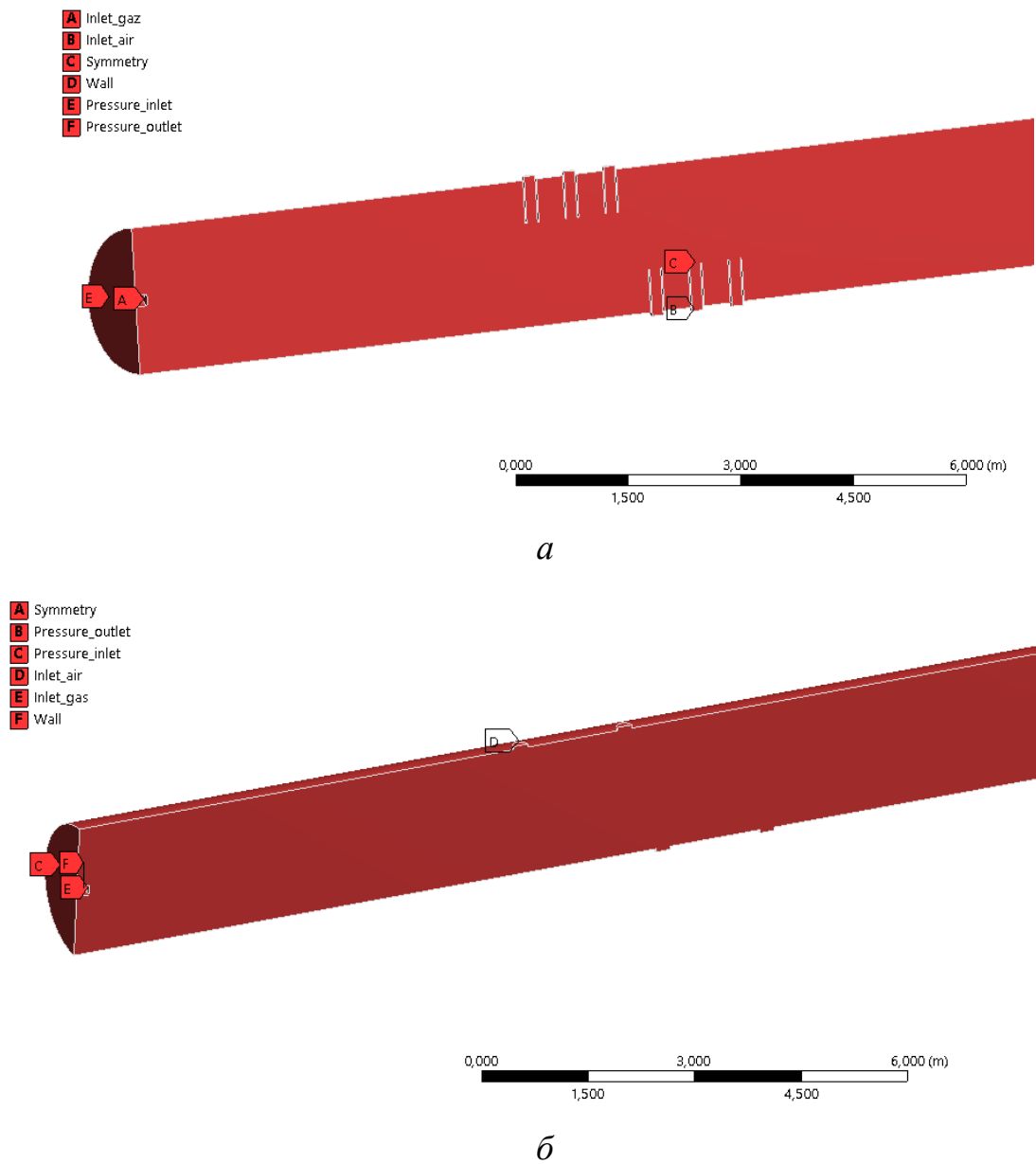
Таблиця 9.1 – Фізичні властивості повітря й димових газів

Матеріал/властивість	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , Дж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\mu$ , Па·с
Повітря (димові газ)	1,225	1006,43	0,0242	$1,7894 \times 10^{-5}$

Примітка:  $\rho$  – густина;  $c_p$  – масова ізобарна теплоємність;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості.

Під час виконання розрахунків гідродинамічного стану колекторів для подачі повітря в обертову піч задавалися такі граничні умови (рисунок 9.5): на вході в колектори для подачі повітря (Inlet) – швидкість 28 м/с; на виході з колектора (Outlet) – нульовий тиск; на поверхнях стінок колектора (wall) – умови прилипання (нульова швидкість потоку).

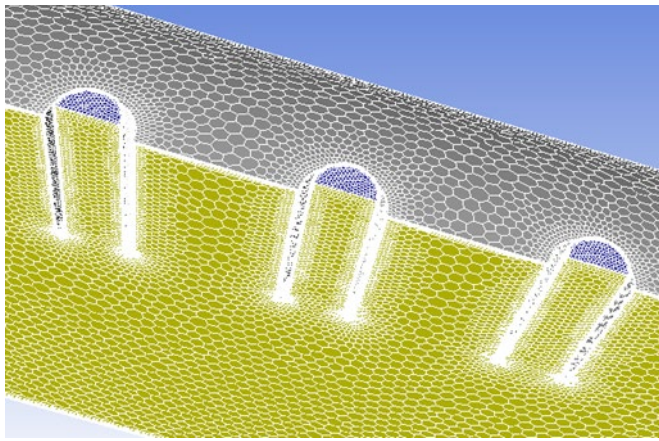
Числові моделі гідродинамічного стану робочого простору обертової печі зі схемами навантаження наведено на рисунку 9.8, а результат дискретизації цих моделей на рисунку 9.9.



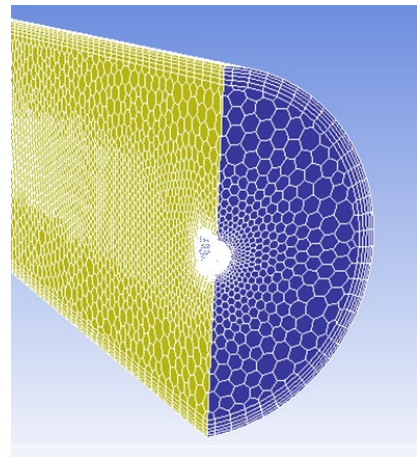
*a* – базова конструкція; *б* – модернізована конструкція

Рисунок 9.8 – Числові моделі гідродинамічного стану робочого простору  
обертової печі зі схемами навантаження

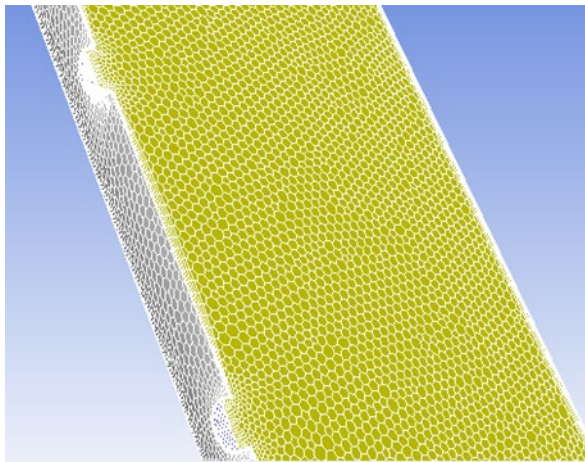




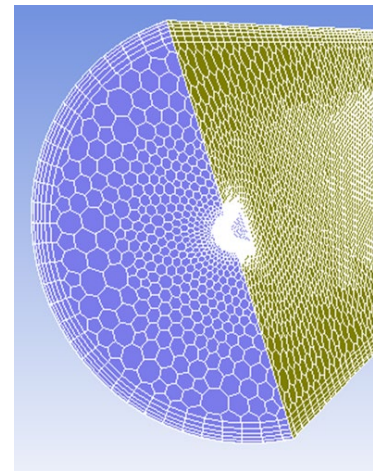
*a*



*б*



*в*



*г*

*a, б* – базова конструкція; *в, г* – модернізована конструкція

Рисунок 9.9 – Дискретизація числових моделей гідродинамічного стану робочого простору обертової печі з використанням полі гідронів та формуванням пограничного шару

Фізичні властивості повітря і димових газів, що використовуються в розрахунках гідродинамічного стану робочого простору обертової печі, наведено в таблиці 9.1.

Під час виконання розрахунків гідродинамічного стану обертової печі задавалися такі граничні умови (рисунок 9.8): на вході потоків повітря через колектори (inlet\_air) – швидкість 25,8 м/с (в базовій конструкції) та 27,6 м/с (в модернізованій конструкції); на вході потоку газо-повітряної суміші пального (inlet\_gas) – швидкість 32,7 м/с; на завантажувальному торці печі – вихідному



за газами (pressure\_outlet) – розрідження -50 Па; на вивантажувальному торці печі – вхідному за атмосферним повітрям (pressure\_inlet) – задається нульовий тиск; на поверхні симетрії (symmetry) – умови симетрії за потоками; на поверхнях стінок робочого простору печі (wall) – умови прилипання (нульова швидкість потоку).

Числова модель тепло-гідродинамічного стану обертової печі наведено на рисунку 8.10, а результат дискретизації цих моделей на рисунку 9.11.

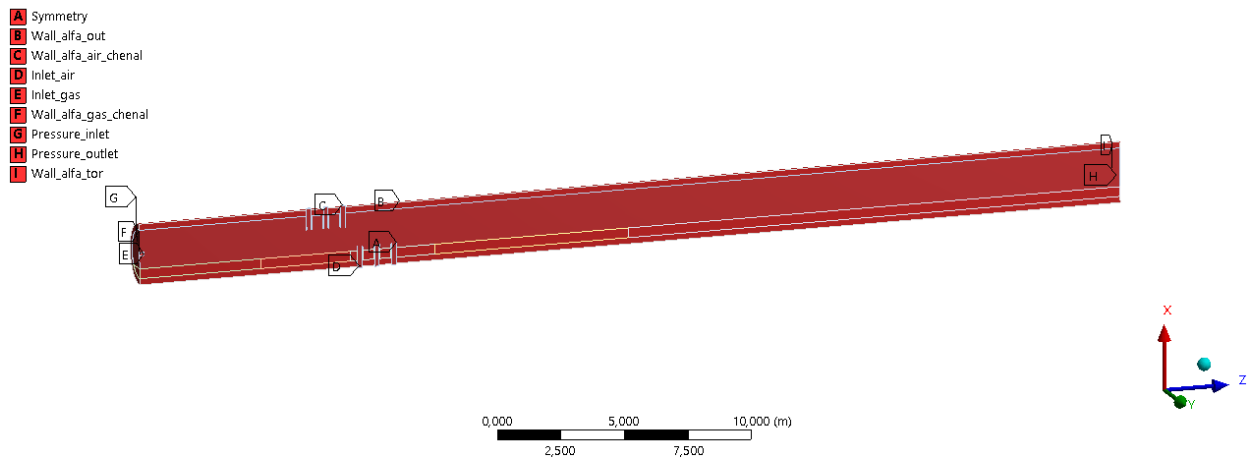
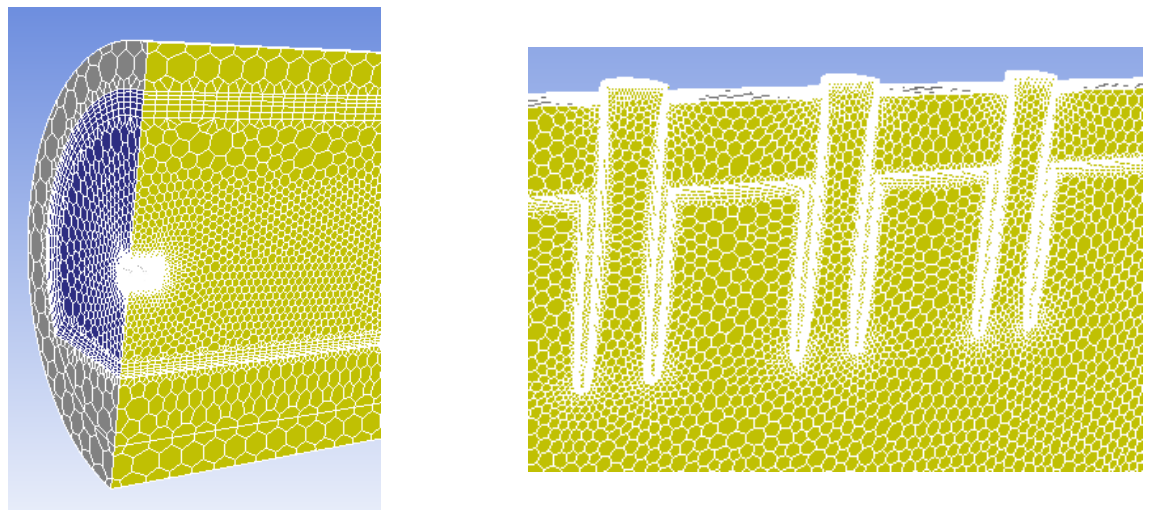


Рисунок 9.10 – Числова модель тепло-гідродинамічного стану обертової печі зі встановленою системою для подачі повітря в зону прожарювання зі схемою навантаження



*a*

*б*

*a* – фрагмент вивантажувального торця печі; *б* – фрагмент повітропідвідними трубами

Рисунок 9.11 – Дискретизація числової моделі тепло-гідродинамічного стану обертової печі зі встановленою системою для подачі повітря в зону

прожарювання з використанням полі гідронів та формуванням пограничного шару

Фізичні властивості повітря і димових газів, що використовуються в розрахунках гідродинамічного стану обертової печі, наведено в таблиці 9.2.

Таблиця 9.2 – Фізичні властивості матеріалів печі

Матеріал/властивості	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , Дж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\mu$ , Па·с	$K$ , м <sup>-1</sup>
Повітря (димові газ)	1,225	1006,43	0,0242	$1,7894 \times 10^{-5}$	5–10
Шамот	1600	—	0,9–1,0	—	—
Нафтовий кокс	800	—	0,5–1,0	—	—

Примітка:  $\rho$  – густина;  $c_p$  – масова ізобарна теплоємність;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості;  $K$  – коефіцієнт поглинання.

Нагрівання шару нафтового коксу у робочому просторі обертової печі моделювався за допомогою задання внутрішніх джерел теплоти, визначених на підставі даних, наведених у п. 5.1.

Числові моделі термомеханічного стану обертової печі наведено на рисунках 9.12, а результат дискретизації цих моделей на рисунку 9.13.

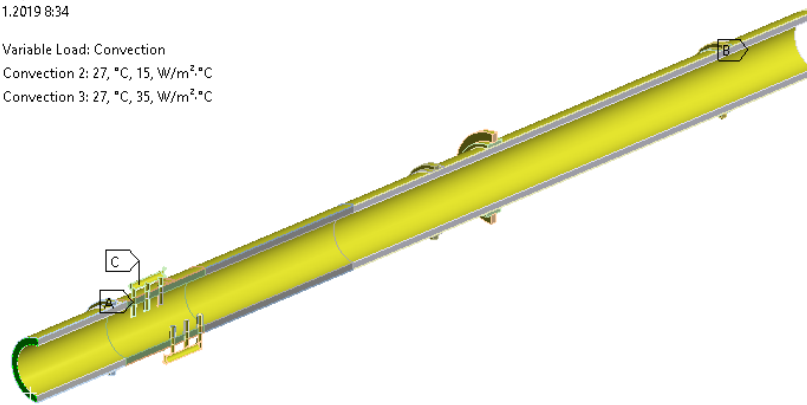
**A: Steady-State Thermal**

Steady-State Thermal

Time: 1, s

15.11.2019 8:34

- A** Variable Load: Convection
- B** Convection 2: 27, °C, 15, W/m<sup>2</sup>·°C
- C** Convection 3: 27, °C, 35, W/m<sup>2</sup>·°C



0,000 2,500 5,000 7,500 10,000 (m)

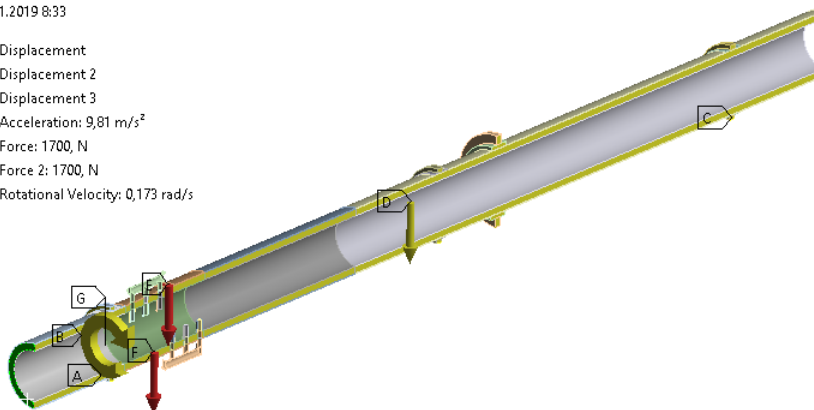
*a***B: Static Structural**

Static Structural

Time: 1, s

15.11.2019 8:33

- A** Displacement
- B** Displacement 2
- C** Displacement 3
- D** Acceleration: 9,81 m/s<sup>2</sup>
- E** Force: 1700, N
- F** Force 2: 1700, N
- G** Rotational Velocity: 0,173 rad/s



0,000 2,500 5,000 7,500 10,000 (m)

*б*

Рисунок. 9.12 – Геометричні моделі обертової печі із встановленою системою для подачі повітря в зону прожарювання разом зі схемами навантаження для числового розв’язання теплової (*a*) і механічної (*б*) задач

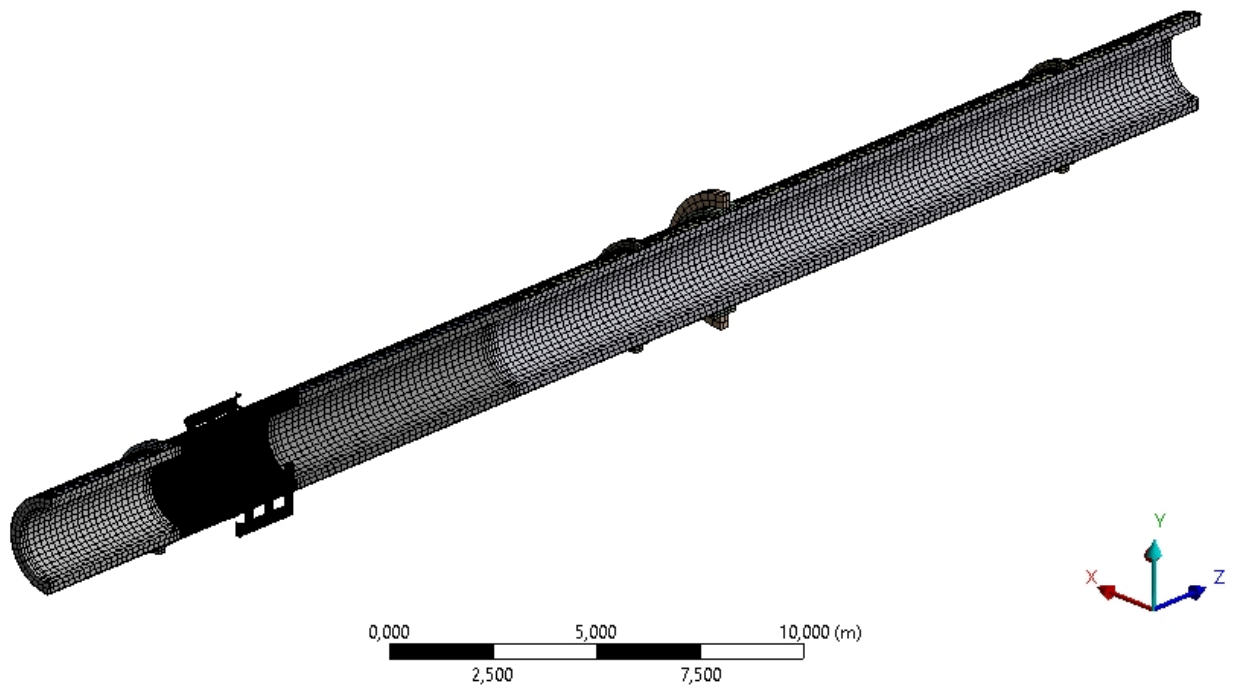
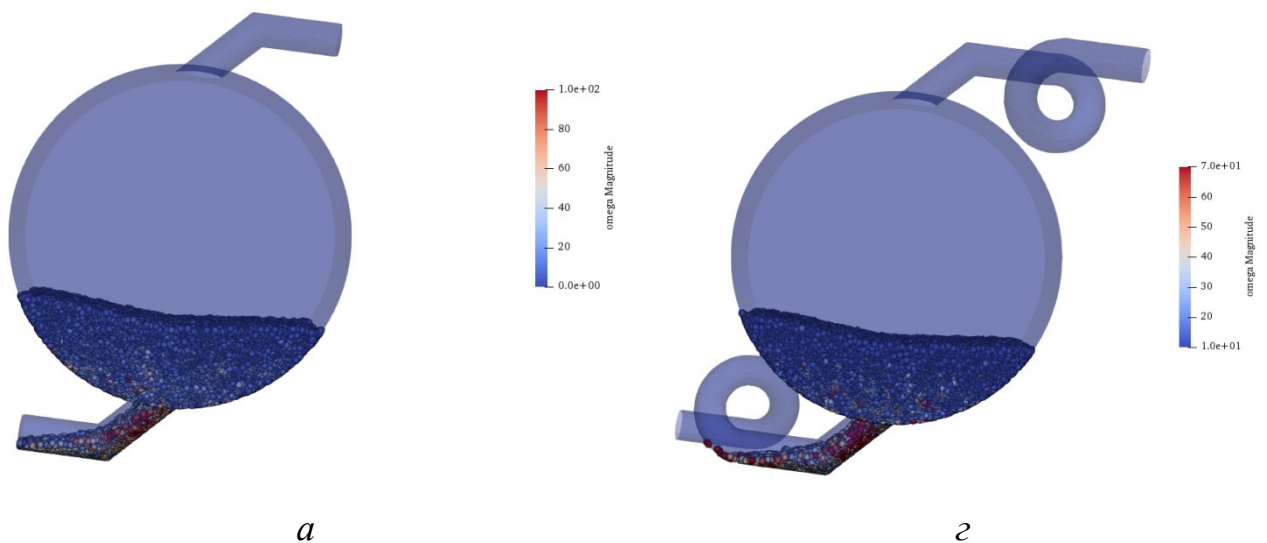
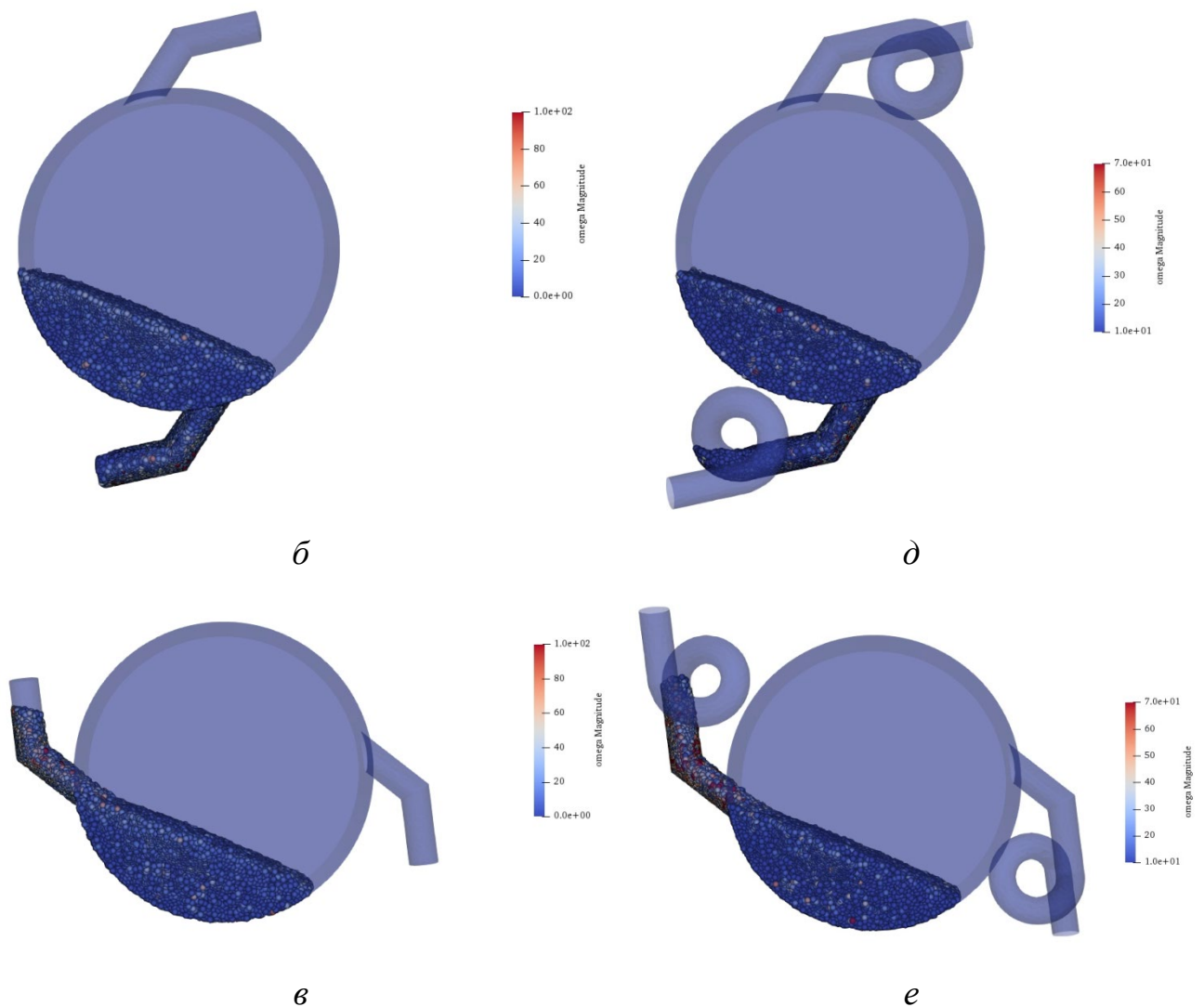


Рисунок 9.13 – Дискретизація числової моделі термомеханічного стану обертової печі зі встановленою системою для подачі повітря в зону прожарювання

Результати числового моделювання динаміки сипкого матеріалу в обертовій печі з подачею повітря в зону прожарювання за аналогами базової та модернізованої за заявкою [17] систем, але без застосування жарових труб, виконаних з використанням ПЗ LIGGGHTS [18] і ParaView [20] для візуалізації результатів розрахунків, наведено на рисунку 9.14.



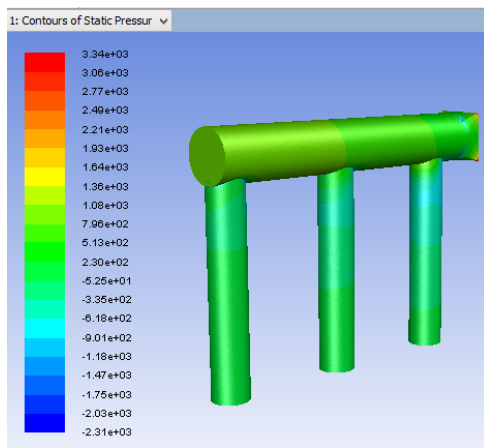


*a, б, в* – аналог базової схеми; *г, д, е* – аналог модернізованої схеми за заявкою [17]

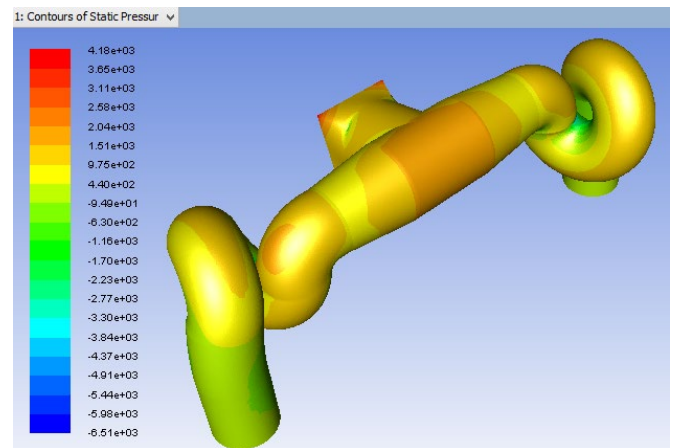
Рисунок 9.14 – Динаміка руху сипкого матеріалу в обертовій печі з подачею повітря в зону прожарювання за аналогами базової та модернізованої систем

Результати аналізу отриманих даних (рисунок 9.14) показують, що наявність об’ємної спіралі у повітропідвідній системі печі дає змогу виключити попадання та накопичування сипкого матеріалу в повітряному колекторі (рисунок 1.6, *г, д*) порівняно з базовим варіантом без неї (рисунок 9.14, *а, б*, аналог базової конструкції). Головними недоліками конструкції з об’ємною спіраллю є складність її виготовлення та великі габаритні розміри.

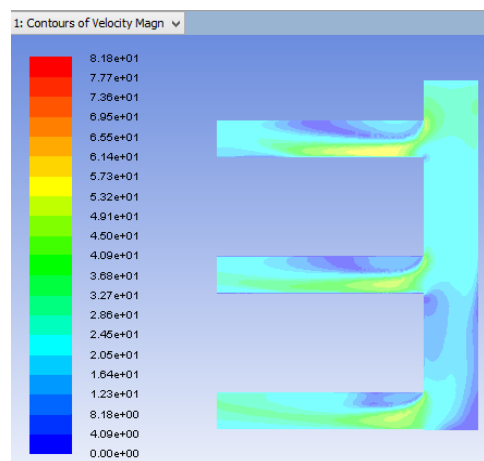
Результати числового моделювання гідродинамічного стану колекторів для подачі повітря в обертову піч наведено на рисунку 9.15.



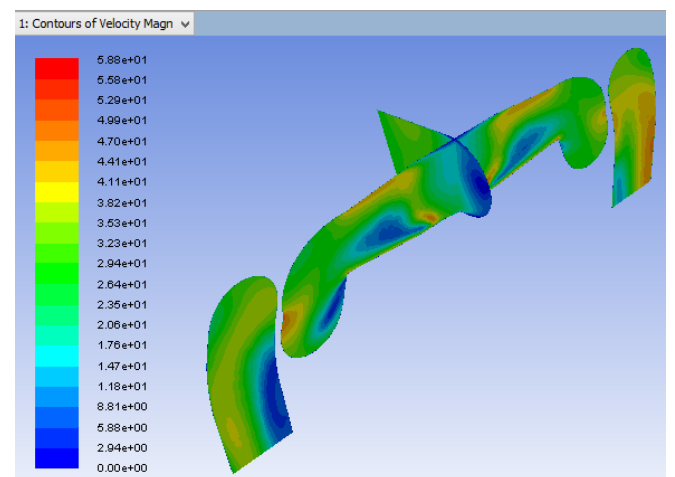
*a*



*б*



*в*



*г*

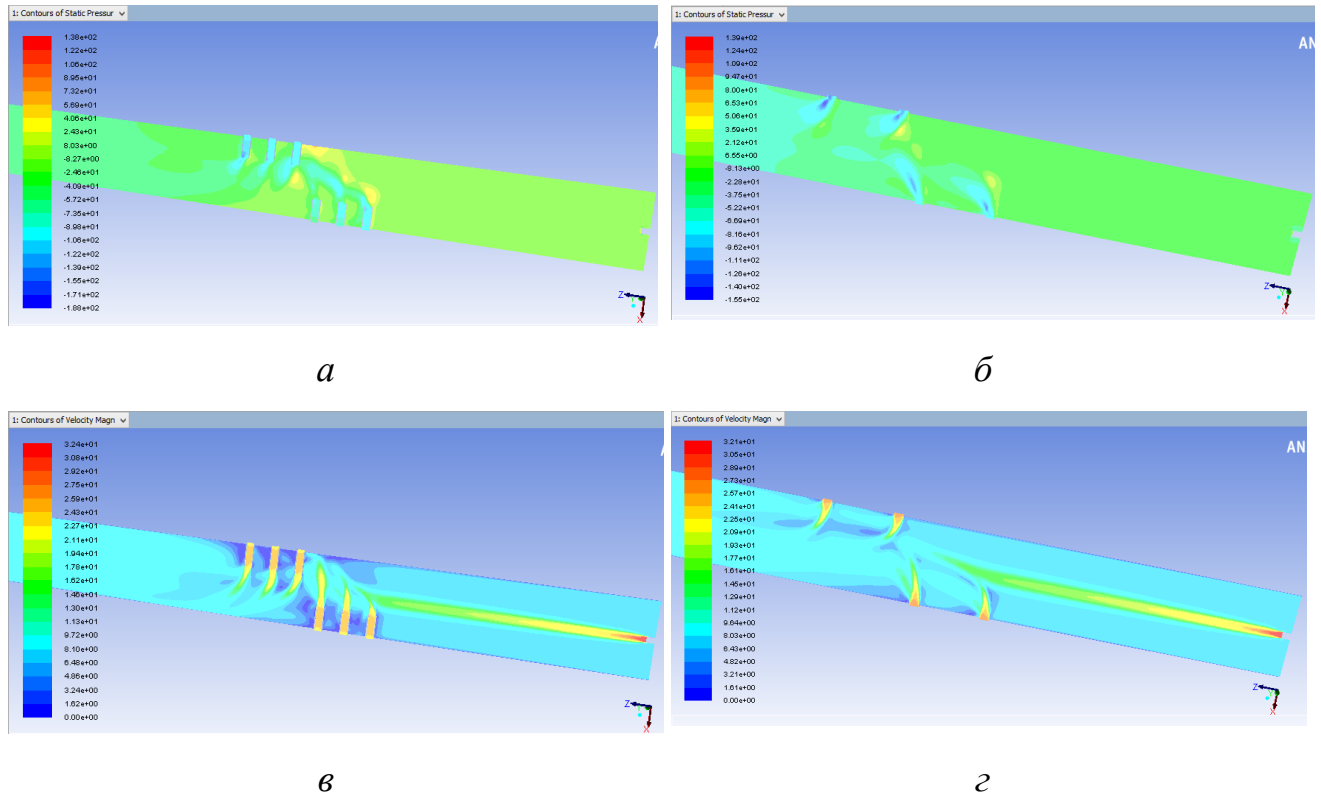
*a, в* – базова конструкція; *б, г* – модернізована конструкція;

*a, б* – поле статичного тиску; *в, г* – поле швидкості

Рисунок 9.15 – Результати числового моделювання гідродинамічного стану колекторів для подачі повітря в обертову піч

Результати аналізу отриманих даних (рисунок 9.15) показують, що середня швидкість повітря на виході з колектора базової і модернізованої конструкцій ставить відповідно 25,0 м/с і 28,59 м/с, а гідравлічний опір – 754 Па і 1596 Па, відповідно. Збільшення приблизно у 2 рази гідравлічного опору модернізованого колектора порівняно з базовим пов'язано з рухом повітря по спіралі та більшою швидкістю. Однак дещо підвищені значення гідравлічних параметрів модернізованого колектора порівняно з базовим не є критичними і, тому не повинні вплинути на експлуатаційні показники його роботи.

Результати числового моделювання гідродинамічного стану робочого простору обертової печі зі встановленими системами для подачі повітря в зону її прожарювання наведено на рисунку 9.16.



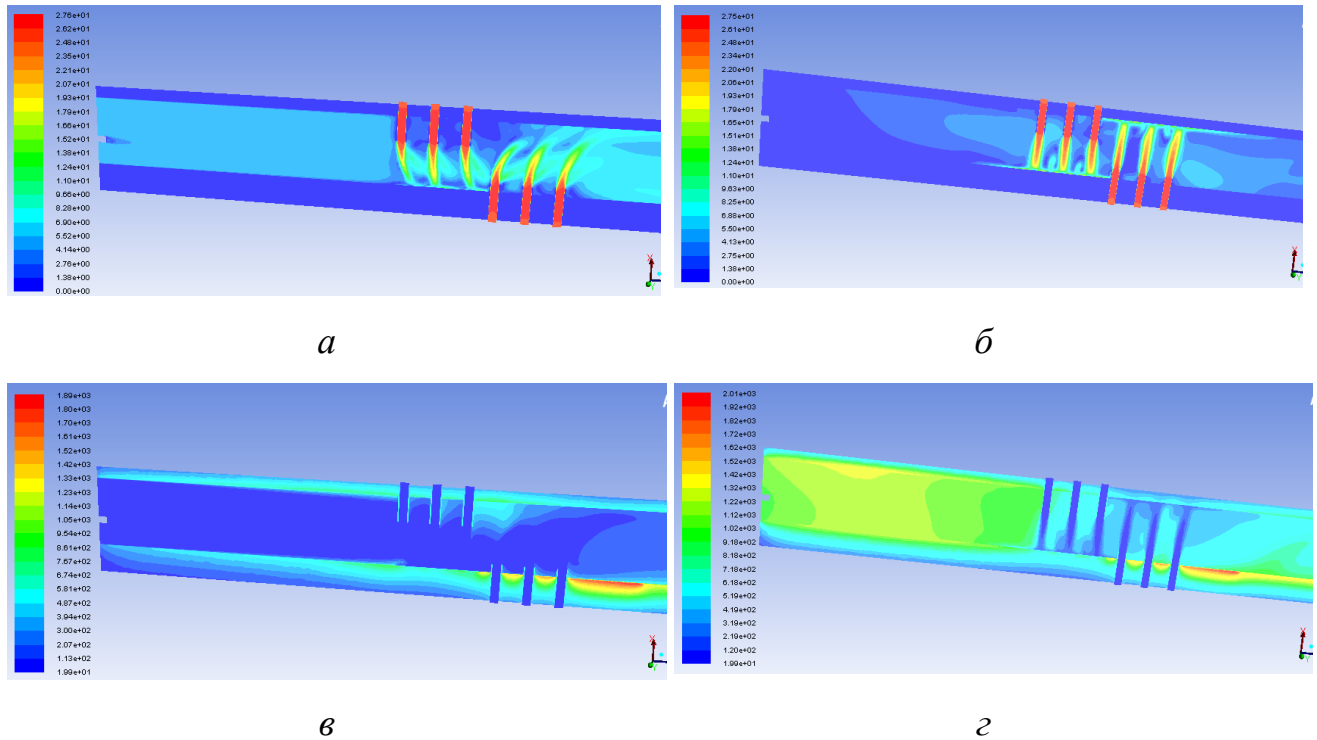
*a, в* – базова конструкція; *б, г* – модернізована конструкція;

*a, б* – поле статичного тиску; *в, г* – поле швидкості

Рисунок 9.16 – Результати числового моделювання гідродинамічного стану робочого простору обертової печі зі встановленими системами для подачі повітря в зону її прожарювання

Результати аналізу отриманих даних (рисунок 9.16) показують, що модернізована система для подачі повітря в зону прожарювання печі порівняно з базовою має суттєві переваги за ступенем відхилення потоків холодного повітря в осьовому напрямку обертової печі. Тобто використання модернізованої системи порівняно з базовою має суттєві переваги, оскільки зменшує ймовірність прямого попадання холодного повітря на гарячу футеровку, що в результаті повинно підвищити ресурс її експлуатації.

Найбільш характерні результати числового моделювання тепло-гідродинамічного стану обертової печі зі встановленими системами для подачі повітря в зону її прожарювання наведено на рисунку 9.17.



*a, в* – вихідний торець печі по матеріалу повністю відкритий, газовий пальник відключений; *б, г* – вихідний торець печі по матеріалу повністю відкритий, газовий пальник відключений; *a, б* – поле швидкості; *в, г* – поле температури

Рисунок 9.17 – Результати оціночних розрахунків тепло-гідродинамічного стану обертової печі зі встановленими жаровими трубами для подачі повітря в зону прожарювання

Аналіз отриманих результатів показує, що:

- у разі відкритого вивантажувального торця печі струмені холодного повітря достатньо відхиляються в осьовому напрямку печі, що підтверджується полем швидкості (рисунок 9.17, *a*) і що також було показано на гідродинамічних розрахунках. Однак, поле температур (рисунок 9.17, *в*) у зонах установки жарових труб і на протилежних сторонах від них все ж змінюється в сторону зменшення;

- у разі повністю закритого вивантажувального торця печі струмені холодного повітря прямо попадають на футеровку, що підтверджується як



полем швидкості (рисунок 9.17, б), так і полем температур (рисунок 9.17, з). Таким чином струмені холодного повітря викликають сильну температурну депресію газового потоку в печі, футеровці та оброблюваному матеріалі в місті установки системи подачі повітря. У цьому випадку також може спостерігатися перегрів зони охолодження печі (рисунок 9.17, з);

– таким чином, незалежно від ступеня відкритості вивантажувального торця печі спостерігається депресія температурного поля в зоні подачі холодного повітря.

Базуючись на результатах аналізу даних порівняльних розрахунків гідродинамічного стану робочого простору печі (рисунок 9.16), які показали, що використання модернізованої системи порівняно з базовою має суттєві переваги, оскільки зменшує ймовірність прямого попадання холодного повітря на гарячу футеровку, що в результаті повинно підвищити ресурс її експлуатації, можна впевнено стверджувати, що оціночні розрахунки тепло-гідродинамічного стану обертової печі з модернізованим вузлом порівняно з базовим не приведуть до погіршення теплового стану печі. Звідси випливає висновок про те, що для визначення критичних теплових параметрів модернізованого вузла можна скористатися даними розрахунків базового вузла. Цей висновок також можна розповсюдити і на термомеханічні розрахунки модернізованої печі.

Для розрахунків механічного стану печі використовувалися такі конструкційні матеріали: кожух печі – Ст. 45 (європейські аналоги 1.0503, C45), колектори для підводу повітря – жароміцна сталь – 20X13 (європейські аналоги 1.4021, X20Cr13), вогнетривка футеровка – шамот. Фізичні властивості вказаних конструкційних матеріалів печі наведено в таблиці 9.3.

Таблиця 9.3 – Фізичні властивості вказаних конструкційних матеріалів печі

Матеріал/властивість	$E$ , ГПа	$\nu$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_T$ , МПа	$\beta$ , K <sup>-1</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)
Ст. 45 (1.0503, С45)	210	0,28	7800	580	$1,1 \times 10^{-5}$	43
20X13, (1.4021, X20Cr13)	215	0,22	7700	600	$1,1 \times 10^{-5}$	26
Шамот	4,5	0,22	1600	35	$5,2 \times 10^{-6}$	0,9

Примітка:  $E$  – модуль пружності під час одновісного розтягу/стискання;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\rho$  – густина;  $\sigma_T$  – границя плинності;  $\beta$  – КЛТР;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності.

При виконанні розрахунків теплового стану обертової печі задавалися граничні умови конвективного типу (рисунок 9.12, а): всередині печі розподіл температури газів поблизу футеровки приймалися на основі оціночних тепло-гідродинамічних розрахунків та наведені на рисунку 9.18, а коефіцієнт тепловіддачі приймався рівним  $\alpha = 100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); на зовнішніх поверхнях кожуха печі задавалися температура повітря рівна  $t = 27$  °С та коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha = 12\text{--}15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); всередині каналів колекторів задавалися температура повітря рівна  $t = 27$  °С та коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha = 25\text{--}35$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

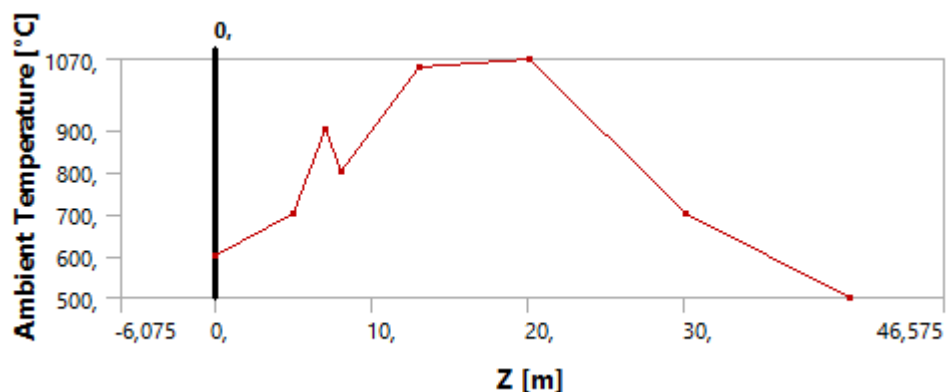


Рисунок 9.18 – Розподіл температури газів поблизу футеровки печі

Результати числового моделювання температурних полів обертової печі зі встановленою системою для подачі повітря в зону прожарювання наведено на рисунку 9.19.

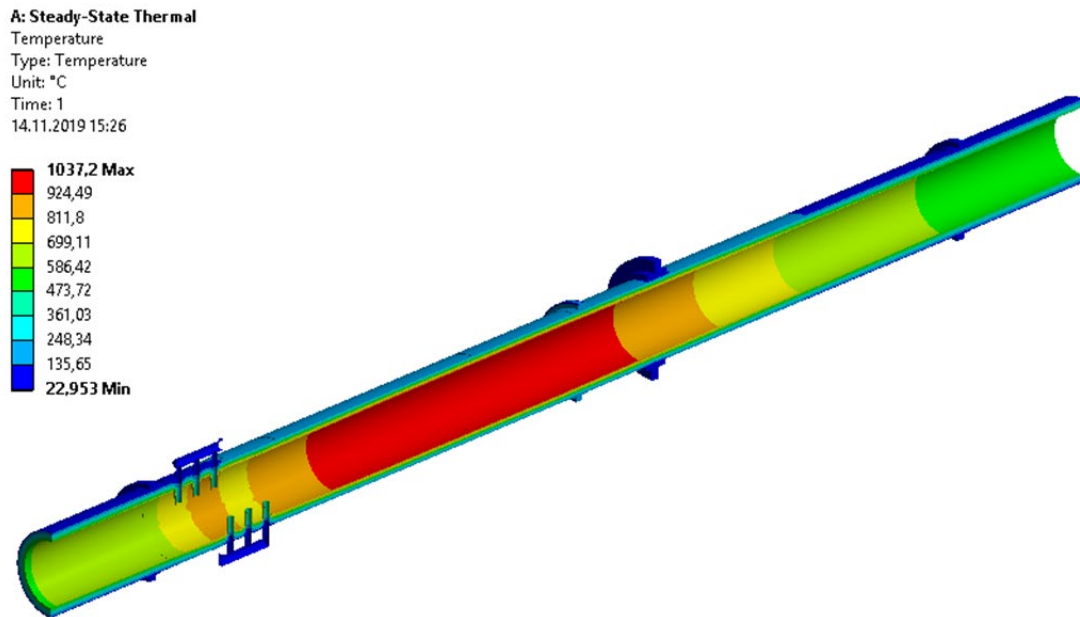


Рисунок 9.19 – Результати розрахунків температурних полів обертової печі зі встановленою системою для подачі повітря в зону прожарювання

Отримане поле температур (рисунок 9.19) використане у розрахунках механічного стану печі (напружено-деформованого стану) як теплове навантаження.

Під час виконання розрахунків механічного стану обертової печі задавалися такі граничні умови (рисунок 9.12, б): закріплення (нульові переміщення) на поверхнях повздовжньої симетрії в напрямку осі  $x$ , на бічній поверхні першої роликові опори печі в напрямку осі  $z$  і на торцевих поверхнях роликових опор печі в напрямку осі  $y$ ; зусилля (1700 Н) в місцях установки вентиляторів на поверхні кожуха печі (масою біля 170 кг кожний). Окрім граничних умов та температурного навантаження, також завалилися об'ємні (інерційні) сили, пов'язані з гравітацією (задавалося прискорення вільного падіння –  $9,81 \text{ м/с}^2$ ) та з обертанням печі (задавалося кутова швидкість обертання печі –  $0,173 \text{ рад/с}$ ).

Результати числового моделювання механічного стану обертової печі зі встановленою системою для подачі повітря в зону прожарювання наведено на

рисунках 9.20–9.22. Аналіз наведених даних напружено-деформованого стану (НДС) обертової печі показує, що установка системи для подачі повітря в зону прожарювання не викликає втрату механічної міцності печі в цілому, що підтверджується результатами розрахунків запасу міцності (рисунок 9.22), який становить не менше 1,43.

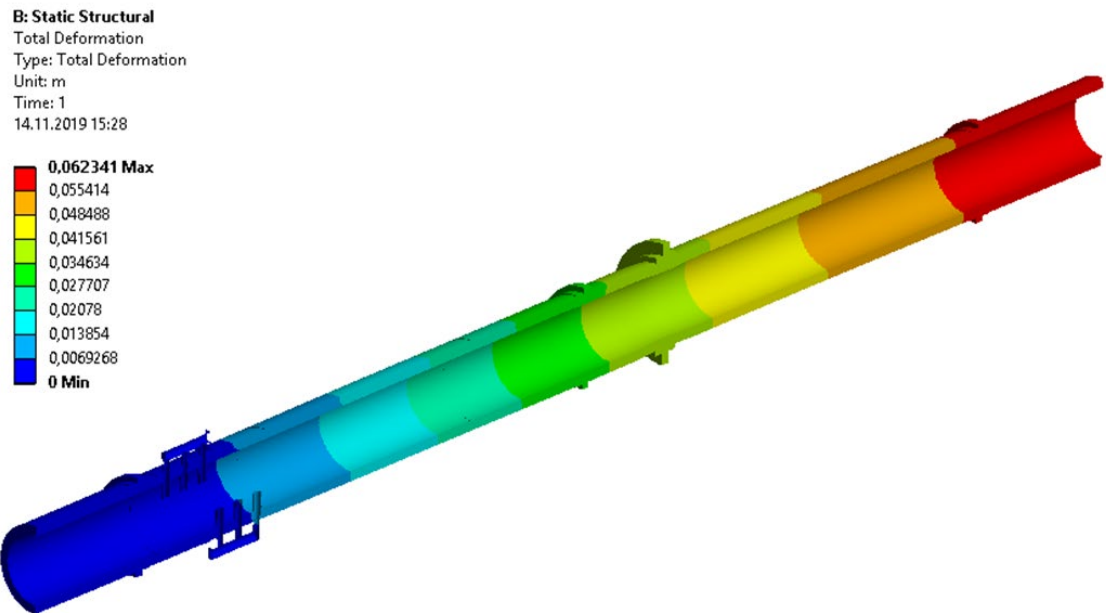


Рисунок 9.20 – Результати розрахунків поля переміщень обертової печі зі встановленою системою для подачі повітря в зону прожарювання

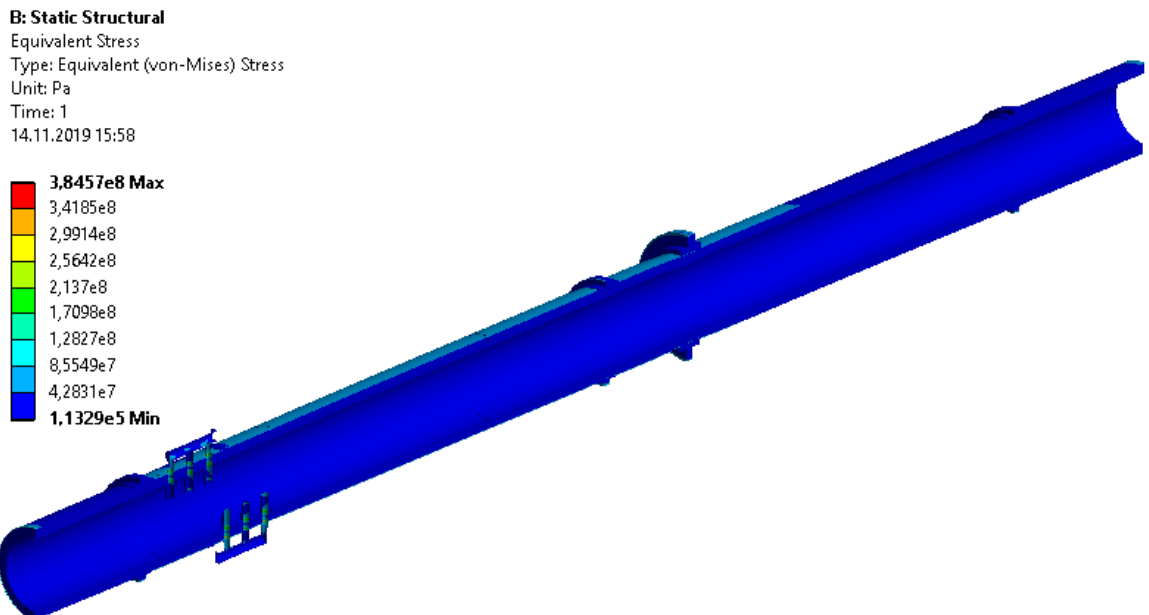


Рисунок 9.21 – Результати розрахунків поля еквівалентних напружень за Мізесом обертової печі зі встановленою системою для подачі повітря в зону прожарювання

B: Static Structural

Safety Factor

Type: Safety Factor

Time: 1

14.11.2019 16:01

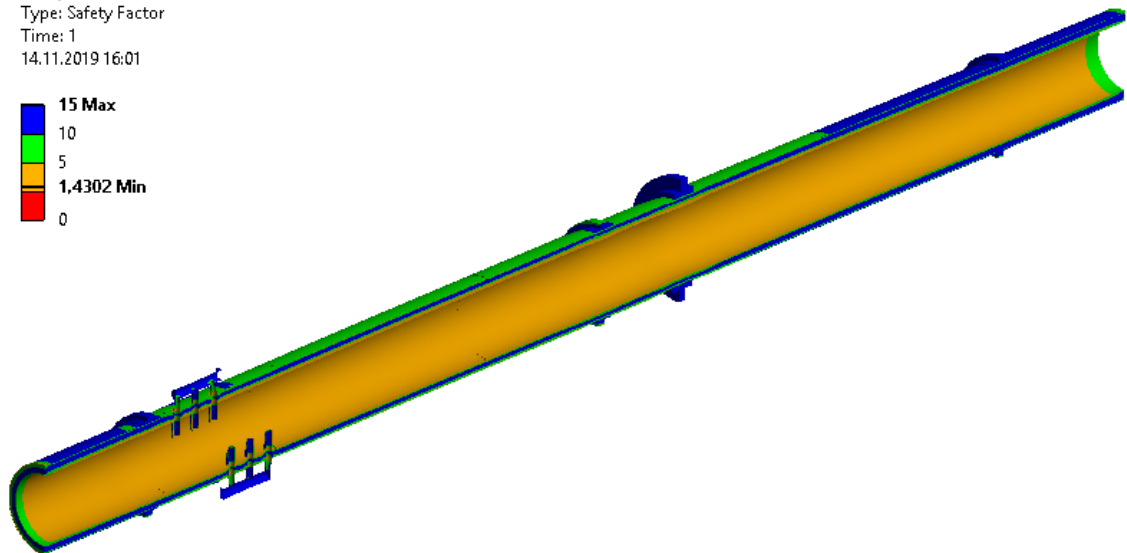


Рисунок 9.22 – Результати розрахунків поля запасу міцності обертової печі зі встановленою системою для подачі повітря в зону прожарювання

Висновок. Результати числового аналізу НДС обертової печі зі встановленою системою для подачі повітря в зону прожарювання показує, що запас міцності конструкції печі становить не менше 1,43, що повинно забезпечити її надійну та довготривалу експлуатацію. Для виконання умов механічної міцності конструкції вузлів колекторів для подачі повітря для їх виготовлення необхідно використовувати жароміцну сталь 20Х13 з границею плинності 600 МПа.

### 9.3 Підтвердження працездатності модернізованого вузла обертової печі з підводу повітря

В магістерській дисертаційній роботі для підтвердження працездатності модернізованого вузла обертової печі з підводу повітря в зону її прожарювання виконано методами наукоємного комп'ютерного інжинірингу [14, 15] з використанням дискретних і континуальних моделей для виконання розрахунків промислового обладнання (див. п. 9.1–9.2).

До результатів числового моделювання модернізованої конструкції обертової печі, що підтверджують її працездатність можна віднести такі:

- наявність об'ємної спіралі у повітропідвідній системі обертової печі дає змогу виключити попадання та накопичування сипкого матеріалу в повітряному колекторі порівняно з базовим варіантом без неї;

- підвищені значення гідравлічних параметрів модернізованого колектора порівняно з базовим не є критичними і, тому не повинні вплинути на експлуатаційні показники його роботи;

- модернізована система для подачі повітря в зону прожарювання печі порівняно з базовою має суттєві переваги за ступенем відхилення потоків холодного повітря в осьовому напрямку обертової печі. Тобто використання модернізованої системи порівняно з базовою зменшує ймовірність прямого попадання холодного повітря на гарячу футеровку, що в результаті повинно підвищити ресурс її експлуатації;

- за допомогою зміни ступеня відкритості вивантажувального торця обертової печі можна однозначно керувати ступенем відхилення струменів холодного повітря, що подається в зону прожарювання, в сторону повздовжньої її осі і таким чином зменшувати температурну депресію футеровки та оброблюваного матеріалу в зонах подачі повітря. Із-за наявності внутрішніх повітропідвідних патрубків у базовому вузлі величина температурної депресії футеровки та оброблюваного матеріалу є більш критичною порівняно з модернізованим вузлом, у конструкції якого внутрішні повітропідвідні патрубки зовсім відсутні;

- НДС обертової печі зі встановленою модернізованою системою для подачі повітря в зону прожарювання показує, що запас міцності конструкції печі становить більше 1, що повинно забезпечити її надійну та довготривалу експлуатацію.

## 9.4 Аналіз достовірності отриманих результатів

Перевірку достовірності результатів розрахунків гідродинамічного стану повітряного колектора (рисунок 9.15, в) виконаємо за допомогою порівняння з аналітичним розв'язком, що випливає із закону збереження маси. Згідно закону збереження маси для колектора базової конструкції в якого один вхід повітря зі швидкістю  $v_{inlet}=28$  м/с через січення квадратного перетину  $f_{inlet}$  (280×280 мм) і три виходи повітря зі  $v_{outlet}$  через труби круглого перерізу  $f_{outlet}$  (Ø190 мм кожна) можна записати таке рівняння

$$v_{inlet} f_{inlet} = 3v_{outlet} f_{outlet},$$

з якого нескладно визначити середню швидкість на виході з колектора

$$v_{outlet} = \frac{v_{inlet} f_{inlet}}{3 f_{outlet}} = 28 \cdot 0,0784 / (3 \cdot 0,0284) = 25,81 \text{ м/с.}$$

За результатами числового моделювання гідродинамічного стану повітряного колектора базової конструкції отримали таке значення середньої швидкості на виході з колектора  $v_{outlet}^p = 25,03$  м/с. Звідки відносна похибка визначення  $v_{outlet}^p$  становить  $\delta_{v_{outlet}^p} = 3,02$  %.

Аналогічні обчислення виконаємо для модернізованого повітряного колектора (рисунок 9.15, з), отримуємо:

$$v_{outlet} = 27,61, v_{outlet}^p = 28,59 \text{ м/с і } \delta_{v_{outlet}^p} = 3,55 \%,$$

що є цілком достатнім для виконання інженерних розрахунків.

Перевірку достовірності результатів розрахунків температурного поля в циліндричному шарі, що складається з вогнетривкої футеровки і сталевій обичайки, проведемо за даними розв'язання термомеханічної задачі (рисунок 9.23), виконавши порівняння з відповідним аналітичним розв'язком задачі стаціонарної теплопровідності багатошарової циліндричної стінки за граничних умов III роду.

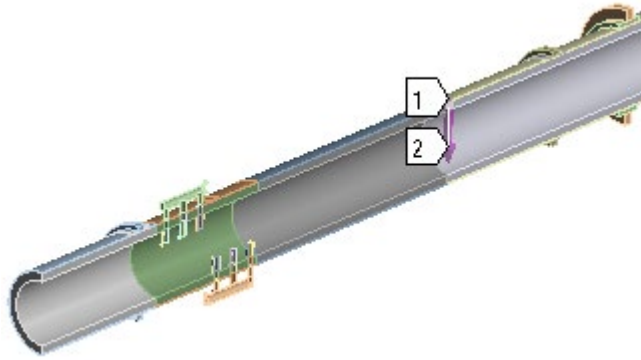


Рисунок 9.23 – До порівняння числового розв’язку з аналітичним

Вихідні дані: діаметри вогнетривкого шару та сталеві обичайки  $d_2/d_1 = 2494/1960$  мм (товщина 267 мм),  $d_3/d_2 = 2534/2494$  мм (товщина 20 мм), відповідно; температури та коефіцієнти тепловіддачі газового середовища в середині та зовні циліндричного корпусу печі  $t_1 = 1060$  °С,  $\alpha_1 = 100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) і  $t_2 = 27$  °С,  $\alpha_2 = 15$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), відповідно; коефіцієнти теплопровідності вогнетривкого шару та сталеві обичайки  $\lambda_1 = 0,9$  Вт/(м·К) і  $\lambda_2 = 40,5$  Вт/(м·К).

Визначимо температури стінок двошарової циліндричної стінки за аналітичними співвідношеннями [21]:

- лінійний коефіцієнт теплопередачі

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{\pi \alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\pi \lambda_1} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{2\pi \lambda_2} \ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right) + \frac{1}{\pi \alpha_2 d_3}} = 18,986 \text{ Вт/(м·К)};$$

- лінійну густину теплового потоку

$$q_l = K_l (t_1 - t_2) = 19613,03 \text{ Вт/м};$$

- температура на внутрішній стінці вогнетриву

$$t_{c_1} = t_1 - q_l \frac{1}{\pi \alpha_1 d_1} = 1028,15 \text{ °С};$$

- температура на зовнішній стінці вогнетриву

$$t_{c_2} = t_1 - q_l \left( \frac{1}{\pi \alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\pi \lambda_1} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \right) = 192,47 \text{ °С};$$

- температура на зовнішній стінці сталеві обичайки



$$t_{c_3} = t_2 + q_l \frac{1}{\pi \alpha_2 d_3} = 191,25 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Результати розрахунків за числовим та аналітичним розв'язками зведені в таблицю 9.4.

Таблиця 9.4 – Порівняння результатів розрахунків за числовим та аналітичним розв'язками для двошарової циліндричної стінки

$d$ , м	$\Delta$ , м	$t_c^p$ , $^\circ\text{C}$	$t_c^a$ , $^\circ\text{C}$	$\delta^p$ , %
1,96	0	1028,0	1028,15	0,015
2,494	0,267	192,25	192,47	0,114
2,534	0,287	191,27	191,25	-0,01

Примітка:  $d$  – діаметр;  $\Delta$  – товщина стінки;  $t_c^p$ ,  $t_c^a$  – температури визначені за числовим та аналітичним розв'язками, відповідно;  $\delta^p$  – відносна похибка.

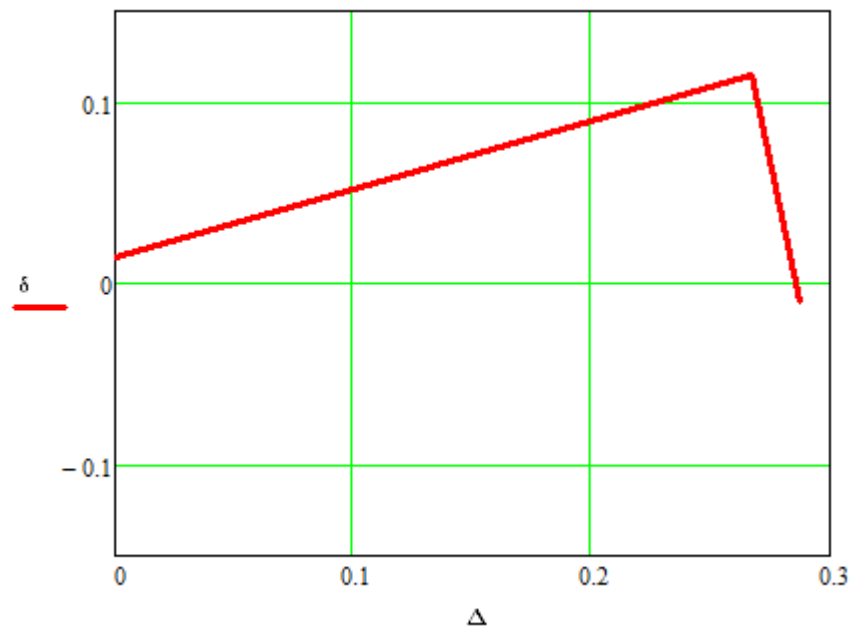


Рисунок 9.23 – Залежність відносної похибки визначення температури циліндричної стінки за числовим розв'язком

Отримані результати порівняння є цілком достатніми для виконання інженерних розрахунків.

Для перевірки достовірності результатів розрахунків механічних напружень в циліндричному шарі, спричинених температурним навантаженням скористаємося аналітичним розв'язком задачі для умов, коли довга циліндрична оболонка закріплена з усіх боків піддається температурному навантаженню, яке змінюється за лінійним законом і тільки товщині оболонки (рисунок 9.24) [22]. Аналітичний розв'язок такої задачі для  $\sigma_\theta$  на середині товщини циліндричної оболонки має вигляд

$$\sigma_\theta|_{z=\frac{h}{2}} = -\frac{E\beta\Delta T}{2} \left[ 1 + \frac{\sqrt{1-\nu^2}}{\sqrt{3}(1-\nu)} \right], \quad (9.1)$$

де  $\Delta T$

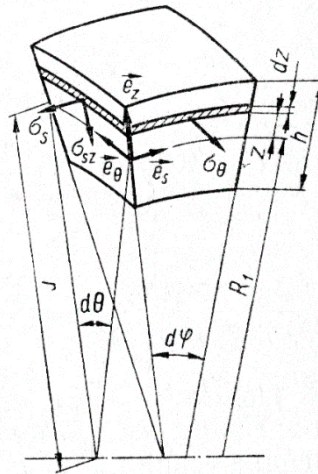


Рисунок 9.24 – До розв'язання задачі термопружності циліндричної оболонки аналітичним способом

Вихідні дані для розрахунків: матеріал – шамот, фізичні властивості бралися з таблиці 9.3, внутрішній діаметр циліндричної оболонки становить  $d_1 = 1960$  мм; товщина циліндричної оболонки становить  $h=267$  мм; перепад температур по товщині циліндричної оболонки становить  $\Delta T=835,75$  °С. За таких умов напруження  $\sigma_\theta$  розраховане за аналітичною залежністю становить

$$\sigma_\theta|_{z=\frac{h}{2}}^a = -1,834 \times 10^{-7} \text{ Па.}$$

Для порівняння аналітичного розв'язку з числовим було створено спеціальну тестову термомеханічну модель циліндричної оболонки (рисунок 9.25).

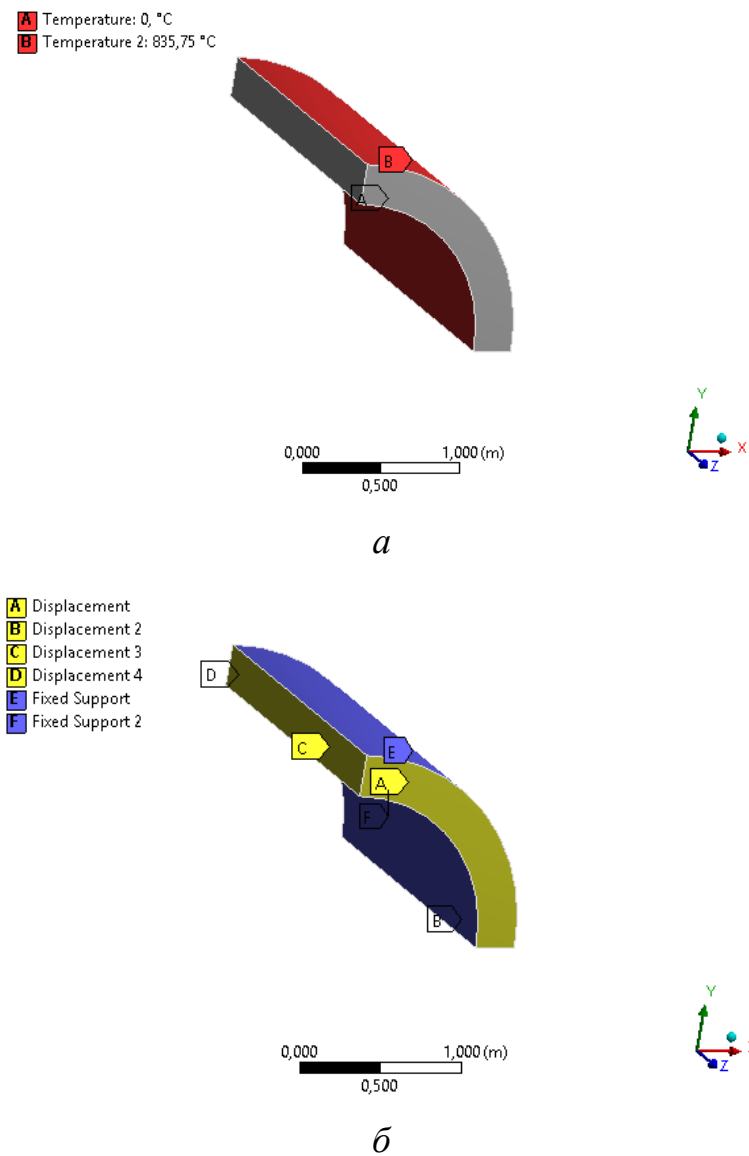


Рисунок 9.25 – Геометричні моделі циліндричної оболонки зі схемами навантаження для числового розв'язання теплової (а) і механічної (б) задач

Результати розрахунків фізичних полів за тестовою термомеханічною моделлю циліндричної оболонки наведено на рисунках 9.26, 9.27.

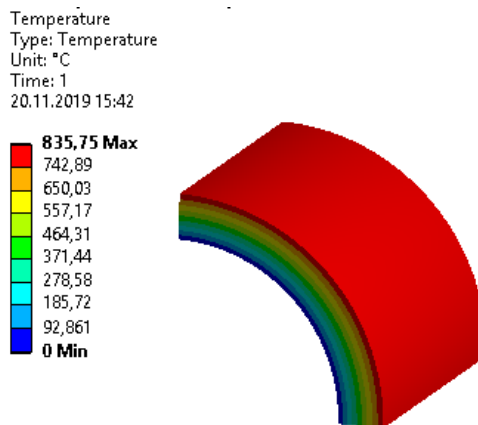
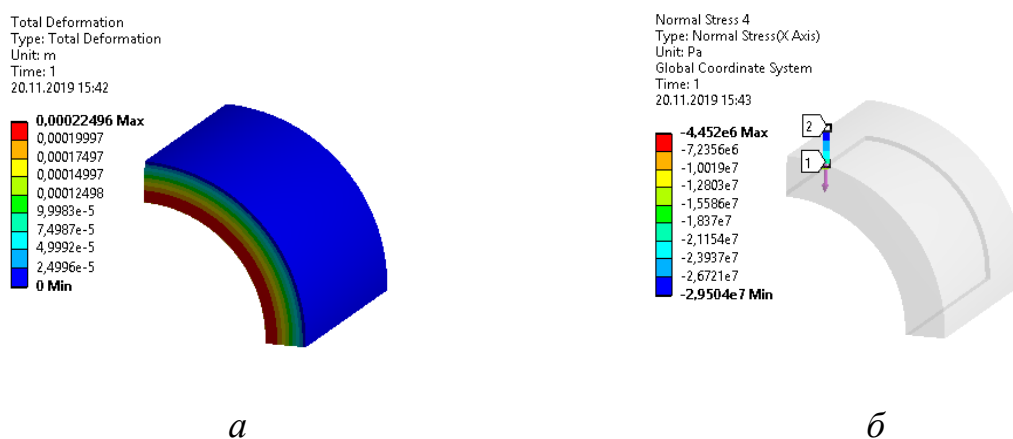


Рисунок 9.26 – Результати розрахунків температурних полів циліндричної оболонки



*a* – поле переміщень; *б* – поле напруження

Рисунок 9.26 – Результати розрахунків механічних полів циліндричної оболонки

За результатами числового розв'язку тестової задачі, що відповідає умовам аналітичного розв'язку, величина шуканого напруження становить  $\sigma_{\theta}|_{z=\frac{h}{2}}^p = -1,8398 \times 10^{-7}$  Па. Звідки відносна похибка визначення напруження

$\sigma_{\theta}|_{z=\frac{h}{2}}$  за числовою моделлю становить  $\delta_{\sigma_{\theta}} = 0,38$  %.

Базуючись на даних оцінки похибки визначення напруження за тестовою числовою моделлю цілком аргументовано можна стверджувати, що отримані результати розрахунків НДС обертової печі (рисунки 9.20–9.22) мають похибку не вищу за 0,5–1 %.

## Висновки

Під час виконання магістерської дисертації на тему «Піч обертова для прожарювання нафтового коксу з модернізацією вузла підводу повітря» виконано проектування обертової печі для прожарювання нафтового коксу.

1) Підготовлено такі розділи магістерської дисертації: опис технологічної схеми лінії, де використовується обертова піч; призначення й галузь застосування обертової печі, технічна характеристика обладнання, патентно-літературний огляд та обґрунтування модернізації підводу повітря, монтаж і експлуатація обертової печі, розробка стартап проекту, охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях під час експлуатації лінії, де використовується обертова піч, модернізація вузла обертової печі з підводу повітря.

2) Виконано розрахунки, що підтверджують працездатність модернізації обертової печі, а саме інженерні розрахунки обертової печі для прожарювання нафтового коксу, розрахунки теплової потужності обертової печі за різної продуктивності, визначення температурних умов діючої обертової печі з подачею вторинного повітря в зону прожарювання за даними кампанії Rain СІІ, числовий аналіз температурних умов роботи сталевих жарових труб в процесі експлуатації модернізованої обертової печі, розрахунки теплової потужності обертової печі за різної продуктивності.

3) Проведено патентно-літературний огляд, за результатами якого обрано патент, який дає змогу здійснити модернізацію обертової печі, що позбавлена недоліків базової конструкції. Модернізована обертова піч, порівняно з діючою забезпечується зниження впливу високотемпературних димових газів і оброблюваного матеріалу на вихідну ділянку перехідної труби, а отже підвищує надійність роботи та ремонтпридатність пристрою в цілому.

4) З використанням CAD-систем Compass і Autocad підготовлено креслення обертової печі, які включають: технологічну схему лінії, складальне креслення обертової печі, наведено схематично поперечний переріз барабана в місці розташування пристрою для подавання атмосферного повітря в барабан

обертової печі та результати математичного моделювання послідовного руху оброблюваного матеріалу в барабані обертової печі під час його.

5) Проведено монтаж і експлуатацію обертової печі, при якому було повністю розглянуто процес ремонту обертової печі та перевірки на випадок заміни окремих запчастин, розглянуто основні компоненти, з яких складається обертова піч, та дізналися в їх призначенні та виготовленні.

6) За результатами інженерних розрахунків вузла для подачі повітря в зону прожарювання обертової печі базової конструкції встановлено, що наявності захисного шару вогнетриву на жарових трубах товщиною не менше 20 мм в якості матеріалу для їх виготовлення можна використовувати сталь 20X13.

7) Розроблено 3D геометричні та відповідні числові моделі фізичного стану обертової печі та її вузлів, що включають: дискретну модель динаміки сипкого середовища в обертовій печі зі встановленою системою подачі повітря різної конструкції, гідродинамічні моделі вузлів для подачі повітря в зону прожарювання та робочого простору обертової печі з вузлами подачі повітря, тепло-гідродинамічна та термомеханічна моделі обертової печі з системою подачі повітря в зону прожарювання.

8) З використанням розроблених дискретних та континуальних числових моделей обертової печі в цілому та її вузлів досліджено фізичний стан обладнання з метою визначення працездатності запропонованої модернізації вузла для подачі повітря в зону прожарювання печі.

9) До основних результатів числового моделювання, що підтверджують працездатність модернізованої конструкції обертової печі та її переваги над базовою, відносяться такі:

- наявність об'ємної спіралі у повітропідвідній системі обертової печі дає змогу виключити попадання та накопичування сипкого матеріалу в повітряному колекторі порівняно з базовим варіантом без неї;

- підвищені значення гідравлічних параметрів модернізованого колектора порівняно з базовим не є критичними і, тому не повинні вплинути на експлуатаційні показники його роботи;

- модернізована система для подачі повітря в зону прожарювання печі порівняно з базовою має суттєві переваги за ступенем відхилення потоків холодного повітря в осьовому напрямку обертової печі. Тобто використання модернізованої системи порівняно з базовою зменшує ймовірність прямого попадання холодного повітря на гарячу футеровку, що в результаті повинно підвищити ресурс її експлуатації;

- за допомогою зміни ступеня відкритості вивантажувального торця обертової печі можна однозначно керувати ступенем відхилення струменів холодного повітря, що подається в зону прожарювання, в сторону повздовжньої її осі і таким чином зменшувати температурну депресію футеровки та оброблюваного матеріалу в зонах подачі повітря. Із-за наявності внутрішніх повітропідвідних патрубків у базовому вузлі величина температурної депресії футеровки та оброблюваного матеріалу є більш критичною порівняно з модернізованим вузлом, у конструкції якого внутрішні повітропідвідні патрубки зовсім відсутні;

- НДС обертової печі зі встановленою модернізованою системою для подачі повітря в зону прожарювання показує, що запас міцності конструкції печі становить більше 1, що повинно забезпечити її надійну та довготривалу експлуатацію.

10) Виконано аналіз достовірності отриманих результатів числового моделювання, за результатами якого встановлено, що:

- відносна похибка визначення швидкості потоків за гідродинамічними та тепло-гідродинамічними числовими моделями обертової печі становить біля 3–3,5 %;
- відносна похибка визначення температури за термомеханічною моделлю обертової печі становить біля 0,15 %;
- відносна похибка визначення механічних напружень за термомеханічною моделлю обертової печі становить біля 0,4–1 %.

11) Наведені дані оцінки похибок визначення фізичних величин за розробленими числовими моделями однозначно підтверджують достовірність отриманих результатів числового аналізу.

## Перелік посилань

1. Малиновський В.В., Коваленко І.В. Методические указания для выполнения курсовых проектов по дисциплине "Процессы и аппараты отрасли". Раздел "Оборудование для разделения, смешения и питания" для студентов машиностроительных и химико-технологических специальностей. - К.: КПИ, 1988.
2. Сапожников М.Я. Машины та апарати промисловості будівельних матеріалів: Атлас конструкцій. — М.: Машгіз, 1979.
3. Методичні вказівки з дипломного проектування обладнання хімічного, полімерного і силікатного підприємств. Розділ – "Технологія хімічного машинобудування" , укладачі Глаз П.Г., Коваленко І.В., Малиновський В.В., Пристайлов С.О., К., НТУУ "КПІ" 1997. – 44с
4. Механическое оборудование предприятий вяжущих материалов и изделий из них. Курсовое проектирование. укл. Федоров Г.Д., Иванов А.Н., Издательство при Харьковском Университете., 1986.
5. Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: Справочное издание: В 2-х книгах. Книга 1 Под ред. В. Г.Лисиенко. - М.: Теплагтехник, 2004.- 688 с
6. Решетов Д.Н. Детали машин. М., Машиностроение, 1989.
7. І. О. Мікульонюк / Монтаж, експлуатація та ремонт обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв. Навчальний посібник. – К.: НТУУ — КПІ, 2001. – 27 с.
8. Машины и аппараты химических производств. Под общей редакцией Соколова В.Н. – Л.: Машиностроение, 1982.
9. Методичні вказівки до виконання курсового проекту “Технологія машиностроєння”, Київ КПІ, 1992.
10. М.Е. Егоров та ін. “Технологія машиностроєння”, М.: “Высшая школа”, 1976, - 534с.
11. Ансеров М.А. “Приспособления для металлорежущих станков”, Л.: Машиностроение, 1975, - 658 с.



12. І.В. Коваленко “Експлуатація, ремонт і монтаж обладнання хімічних виробництв” К. 2003.-149 с.
13. Presentation Carbon Raw Materials for the Aluminum Industry by Les Edwards, Rain CII Carbon // Metal Bulletin 30<sup>th</sup> International Aluminum Industry Conference. Режим доступа : <https://is.gd/5XdQ85> —Дата доступа : 21-23.09.2015. — Les Edwards, Rain CII Carbon.
14. Механіка суцільних середовищ. Теоретичні основи навчальної дисципліни [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування», «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництв полімерних і будівельних матеріалів і виробів» / А. Я. Карвацький. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 290 с. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23917>
15. Інжиніринг пакувального обладнання. Конспект лекцій з навчальної дисципліни [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування» / А. Я. Карвацький. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 142 с. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23915>
16. Основные элементы SolidWorks / Dassault Systems SolidWorks Corporation, a Dassault Systems S.A. company, 300 Baker Avenue, Concord, Mass. 01742 USA, 1995–2009, — 534 p.
17. Заявка u201911206 Україна, МПК(2019.01) F27B 7/36 F27B 7/22 C10B 49/04. Пристрій для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі / А. Я. Карвацький, С.В. Лелека, І.О. Мікульонок, Є.М. Панов, О.М. Глухов, А.В. Вагін, О.В. Бондаренко; заявник – ПАТ «Укрграфіт». № u201911206; дата подання 18.11.2019.
18. LIGGGHTS Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Code. URL: <http://www.liggghts.com> (last access: 24.10.2019).

19. ANSYS Engineering Simulation & 3D Design Software ANSYS [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ansys.com/> (last access: 24.10.2019).
20. ParaView. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application. URL: <http://www.paraview.org/> (last access: 24.10.2019).
21. Исаченко В. П. Теплопередача : учебн. для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. М. : Энергоиздат, 1981. 416 с.
22. Коваленко А. Д. Основы термоупругости. К. : Наукова думка, 1970. 307 с.
23. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов: учебное пособие для вузов - М.: металлургия, 1990.- 238 с.
24. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки. Режим доступа : <https://cutt.ly/Qe35krJ>
25. Методичні вказівки до виконання курсового проекту “Технология машиностроения”, Киев КПИ, 1992.
26. Егоров М.Е. та ін. “Технология машиностроения”, М.: “Высшая школа”,1976, - 534с.
27. Ансеров М.А. “Приспособления для металлорежущих станков”, Л.: Машиностроение, 1975, - 658 с.
28. І.В. Коваленко “Експлуатація, ремонт і монтаж обладнання хімічних виробництв” К. 2003.-149 с.